

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

**GESTÃO DE RISCOS LOGÍSTICOS EM CADEIAS DE**  
**SUPRIMENTOS: OTIMIZAÇÃO VIA METAMODELO DE**  
**SIMULAÇÃO**

**JOSENILDO BRITO DE OLIVEIRA**

**ITAJUBÁ, 2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

**JOSENILDO BRITO DE OLIVEIRA**

**GESTÃO DE RISCOS LOGÍSTICOS EM CADEIAS DE**  
**SUPRIMENTOS: OTIMIZAÇÃO VIA METAMODELO DE**  
**SIMULAÇÃO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Produção – PPGEP/UNIFEI  
como parte dos requisitos para a obtenção do  
título de Doutor em Engenharia de Produção.

**Área de concentração:** Engenharia de Produção.

**Orientador:** Prof. Dr. Renato da Silva Lima

**Coorientador:** Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi.

**ITAJUBÁ, 2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

**JOSENILDO BRITO DE OLIVEIRA**

**GESTÃO DE RISCOS LOGÍSTICOS EM CADEIAS DE**  
**SUPRIMENTOS: OTIMIZAÇÃO VIA METAMODELO DE**  
**SIMULAÇÃO**

Tese aprovada por banca examinadora no dia 29 de março de 2019,  
conferindo ao autor o título de *Doutor em Engenharia de Produção*.

**Banca examinadora:**

**RENATO DA SILVA LIMA, Prof. Dr.**  
**Orientador (IEPG/UNIFEI)**

**JOSÉ ARNALDO BARRA MONTEVECHI, Prof. Dr.**  
**Coorientador (IEPG/UNIFEI)**

**FABIANO LEAL, Prof. Dr.**  
**Membro avaliador (IEPG/UNIFEI)**

**FÁBIO FAVARETTO, Prof. Dr.**  
**Membro avaliador (IEPG/UNIFEI)**

**FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS, Prof. Dr.**  
**Membro avaliador (FEG/UNESP)**

**ENZO MOROSINI FRAZZON, Prof. Dr.-Ing.**  
**Membro avaliador (PPGEP/UFSC)**

**ITAJUBÁ, 2019**

# DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de tese a todos que contribuíram para os resultados desta pesquisa, especialmente ao suporte de (o):

minha mãe **Alba de Brito Oliveira**, por ter me oferecido relevantes diretrizes para a minha formação humana e educacional.

meu pai **Josenildo de Oliveira**, por ter me dado uma estrutura básica para que eu pudesse aprender e formar o meu conhecimento.

meu filho **Yago Lorenzo**, grande paixão de vida, por compreender a minha ausência e me tolerar nos momentos difíceis ao longo destes anos de doutoramento.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Renato da Silva Lima, pela dedicação, paciência, contribuições, discussões ricas e reflexões ofertadas durante o processo de minha formação doutoral. Ao meu coorientador, o professor José Arnaldo Barra Montevechi, pelo devido suporte.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, pela oportunidade de ter me selecionado e pelo importante conhecimento que me foi dado. Agradeço ao brioso corpo docente pelos relevantes ensinamentos. Agradeço aos coordenadores do programa, Rafael Coradi Leme e Carlos Henrique Pereira de Melo, pelos serviços de alta qualidade prestados. Agradeço ao corpo de funcionários da UNIFEI. Agradeço aos colegas e amigos pelos momentos maravilhosos que eu tive ao lado de vocês, especialmente David, Diogo, Elisa, Giancarlo, Harlenn, Júlio, Marcella, Patrícia, Roberta e Taynara.

Agradeço à disponibilidade e atenção dos membros da banca em avaliar esse trabalho de tese, bem como às contribuições e sugestões que serviram para melhorar a qualidade da pesquisa. Assim, obrigado aos professores Enzo Morosini Frazzon, Fabiano Leal, Fábio Favaretto e Fernando Augusto Silva Marins pelas recomendações ao trabalho.

Agradeço ao grupo de pesquisa LOGTRANS, que me ofereceu a oportunidade de desenvolver este trabalho. Eu agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG. De maneira honrosa, eu agradeço aos coordenadores do PPGEP, ao meu ilustre orientador e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico –CNPq – pela concessão de uma bolsa para cursar doutorado sanduíche na Universidade do Tennessee, Estados Unidos da América.

Agradeço à Universidade do Tennessee pelo grande acolhimento, pela magnífica estrutura e pela qualidade prestada na área de Engenharia Industrial. Agradecimentos especiais aos meus orientadores, professores John Kobza e Mingzhou Jin, e aos colaboradores do departamento de Engenharia Industrial e Sistemas, Yvette Gooden, Marie Clark e Benjamin Call. Agradeço aos honrados amigos que fiz na cidade de Knoxville: Diogo, Erick, Gabriela, Lucas, Mateus, Paulo, Renata e Roberto, em especial à Danielle e Wanessa, que me receberam muito bem.

Agradeço aos amigos professores da Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG – Edimar e Kegenaldo, pelas conversas descontraídas, pela ajuda e devidos aconselhamentos. Agradeço à minha instituição – UFCG – por me conceder os afastamentos regimentais para que eu pudesse cursar o doutorado pela UNIFEI e o doutorado sanduíche pela Universidade do Tennessee.

Agradecimentos aos professores David Custódio e David Kelton pelos auxílios na construção do modelo de simulação.

Agradeço aos parentes e membros de minha família, pelo estímulo, motivação e inspiração, inclusive aos que não estão mais conosco. O meu respeito e agradecimentos ao apoio. Muito obrigado ao meu filho **YAGO LORENZO**, por ter suportado com resignação minha ausência no período de doutoramento. Por você, eu sempre acreditei ser possível superar os desafios do dia a dia em seu benefício e alcançar os meus sonhos. Meu obrigado especial à minha grande mãe, ALBA, que supriu o meu filho com muito amor, carinho, compreensão, ensinamentos e lições durante o transcorrer do curso de doutorado. Agradeço-a por ter sido mãe duas vezes. Agradeço também ao meu pai, JOSENILDO pelo apoio ao meu trabalho.

Por fim, os meus agradecimentos finais são para DEUS, razão do meu ser, cujo filho JESUS CRISTO de NAZARÉ ofereceu-me diretrizes de vida para amanhã eu ser alguém melhor do que eu fui ontem. A minha evolução passa pela condição e amor que tenho ao meu próximo. Obrigado DEUS! Obrigado JESUS!

# RESUMO

Alguns tipos de riscos podem causar danos às cadeias de suprimentos, provocando rupturas nos fluxos de materiais e produtos acabados. Riscos logísticos se relacionam às falhas nos processos de transporte, armazenagem, produção e vendas. A gestão adequada desses riscos é fator crítico para a integração dos fluxos sob a responsabilidade da logística e operações, cujas atividades são frequentemente realizadas por provedores de serviços logísticos. Entretanto, observou-se a falta de procedimentos sistemáticos focados na gestão de riscos logísticos que melhor aproveitasse as vantagens da integração entre métodos de simulação e otimização. A pesquisa foi realizada em uma cadeia de suprimentos do segmento automotivo português, a partir de dados secundários disponíveis na literatura. Os problemas desse estudo foram: (a) quais os impactos dos riscos logísticos sobre o desempenho dessa cadeia? (b) sob a influência desses riscos, que ajustes no sistema logístico poderiam melhorar a resposta do arranjo aos impactos? Para solucionar tais questões, definiu-se como objetivo, mitigar os efeitos desses riscos a partir de um metamodelo de simulação para a otimização de parâmetros críticos. As atividades logísticas desempenhadas na cadeia de suprimentos foram escolhidas como objeto de estudo. Essa pesquisa foi classificada como aplicada, quantitativa e exploratória normativa, considerando, respectivamente, a sua natureza, a abordagem do problema e os objetivos. A simulação a eventos discretos, elaborada no ambiente Arena<sup>®</sup>, foi utilizada como método de pesquisa. A otimização Black Box, realizada através do software OptQuest<sup>®</sup>, foi empregada para projetar os parâmetros adequados para o sistema logístico. Um metamodelo de regressão baseado no método OLS foi desenvolvido a partir da projeção e implantação de experimentos, servindo para integrar as saídas do modelo de simulação às entradas do modelo de otimização. Inúmeras técnicas de verificação e validação foram empregadas para calibrar o modelo de otimização via simulação, tais como: implantação modular e análise de sensibilidade. Uma sistemática metodológica fundamentada na abordagem DMAIC foi elaborada para relacionar as etapas de gestão dos riscos logísticos e conduzir aos resultados dessa pesquisa, incluindo a identificação (Definir), avaliação (Mensuração), gestão (Melhoria e análise) e monitoramento (Controle) do risco logístico. Um evento de risco logístico foi inserido no modelo com o fim de reproduzir rupturas no fluxo físico de distribuição e permitir a avaliação dos seus impactos sobre o desempenho da cadeia. Os impactos foram medidos por meio do custo logístico total, do risco de ruptura e da taxa de nível de serviço. Estratégias de mitigação do risco logístico de transporte, como redundância e flexibilidade, foram testadas para minimizar simultaneamente custo e risco e maximizar a taxa de entrega. A solução sugerida pelo modelo multiobjetivo de otimização via simulação mostrou ser adequada e eficaz já que os ajustes no sistema logístico bloquearam as consequências da ruptura. A principal contribuição da pesquisa foi desenvolver procedimentos sistemáticos para melhorar a gestão de riscos logísticos no âmbito de cadeias de suprimentos a partir do uso combinado entre métodos de simulação e otimização.

**Palavras-chave:** Risco logístico; cadeia de suprimentos; metamodelo; simulação; otimização.

# ABSTRACT

Some risks can cause losses to the supply chains, producing ruptures in the flow of materials and finished goods. Logistics risks are associated with failures in transportation, warehousing, production and sales processes. Proper management of these risks is critical for the integration of flows under the responsibility of logistics and operations, whose activities are often carried out by logistics service providers. However, there was a shortage of systematic procedures focused on logistics risk management that take advantage of the integration of simulation and optimization methods. This research was carried out in an automotive supply chain located in Portugal, and based on secondary data available in the literature. The problems of this study are: (a) what are the impacts of logistics risks on the performance of this chain? (b) Under the influence of these risks, which adjustments in the logistics system could improve the response of the arrangement to the impacts? In order to solve such issues, the research objective is mitigating the effects of logistics risks from a simulation metamodel for the optimization of critical parameters. The logistical processes carried out in the supply chain were selected as object of study. About the nature, approach of the problem and objectives, this research was classified as applied, quantitative and exploratory normative, respectively. The discrete event simulation, elaborated in the Arena<sup>®</sup> platform, was used as a research method. The Black Box optimization, performed through OptQuest<sup>®</sup> software, was employed to design the appropriate parameters of the logistics system. An OLS method-based regression metamodel was created from design and implementation of experiments with the purpose of integrating the outputs of the simulation model to the inputs of the optimization model. Numerous verification and validation techniques were applied to calibrate the simulation and optimization model, such as modular implementation and sensitivity analysis. A DMAIC-based methodological systematic was developed to comprise the logistic risk management steps and to lead to the results of this research, containing the identification (Define), assessment (Measurement), management (Improvement) and monitoring (Control) of logistics risks. A logistical risk event was inserted into the model in order to reproduce disruptions in the physical distribution flow and allow the evaluation of its impacts on the supply chain performance. The impacts were measured by the following metrics: total logistic cost, stockout risk and fill-rate. For the transportation risk, two mitigation strategies, redundancy and flexibility, have been performed to simultaneously minimize cost and risk and maximize the fill-rate. The risk response solution suggested by the multiobjective optimization model simulation proved to be adequate and effective since the adjustments in the logistic system blocked the effects of the disruption. The main contribution of the research was to develop systematic procedures to improve the supply chain logistics risk management from the combined use of simulation and optimization methods.

**Keywords:** Logistics risks; Supply chain; Metamodel; Simulation; Optimization.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delimitações do objeto de estudo	19
Figura 2 – Grandes eixos de pesquisa	20
Figura 3 – Escassez de trabalhos sobre risco logístico em cadeias de suprimentos	22
Figura 4 – Estrutura conceitual do perfil do risco	39
Figura 5 – O processo geral de metamodelagem em simulação e otimização	77
Figura 6 – Ciclo metodológico da pesquisa	80
Figura 7 – Classificação da pesquisa	82
Figura 8 – Roteiro geral da pesquisa	87
Figura 9 – Originalidade da pesquisa	90
Figura 10 – Framework simplificado dos procedimentos sistemáticos	94
Figura 11 – Framework estendido da fase definir	96
Figura 12 – Framework para o mapeamento da cadeia de suprimentos	98
Figura 13 – Framework do sistema de medição de desempenho para riscos logísticos	99
Figura 14 – Framework estendido da fase medir e analisar	103
Figura 15 – Framework estendido da fase melhorar	107
Figura 16 – Framework estendido da fase controlar	111
Figura 17 – Árvore de material da submontagem do veículo	118
Figura 18 – A cadeia de suprimentos analisada	122
Figura 19 – Diagrama de fluxo dos processos SCOR®	123
Figura 20 – SIPOC do macroprocesso da cadeia de suprimentos em estudo	124
Figura 21 – Modelo conceitual geral da cadeia de suprimentos automotiva	125
Figura 22 – O modelo geral de simulação da cadeia de suprimentos automotiva	128
Figura 23 – Painel sistema de medição de desempenho/KPIs do modelo de simulação	129
Figura 24 – Lógica de um subsistema do supplier 1.1	130
Figura 25 – Níveis de estoque dos membros da cadeia de suprimentos	133
Figura 26 – Teste pareado para a variável custo logístico	135
Figura 27 – Teste pareado para a variável risco de stockout	136
Figura 28 – Análise de sensibilidade sobre o custo logístico	137
Figura 29 – Análise de sensibilidade sobre o risco de stockout	137
Figura 30 – Análise de sensibilidade sobre o fill-rate	138
Figura 31 – Análise gráfica dos modelos estocástico e determinístico	140
Figura 32 – Matriz gráfica de dispersão para o fill-rate supplier 1.1	142
Figura 33 – Matriz gráfica de dispersão para o custo do stockout supplier 1.1	143
Figura 34 – Matriz gráfica de dispersão para o custo logístico total supplier 1.1	143
Figura 35 – Diagrama de dispersão para o custo de stockout supplier 1.1	144
Figura 36 – Diagrama de dispersão para o custo de logístico total supplier 1.1	144
Figura 37 – Diagrama de dispersão para o fill-rate de SA1	145
Figura 38 – Inserção do evento de risco de transporte	146
Figura 39 – Análise de cenário para o custo logístico total	149
Figura 40 – Análise de cenário para o risco total de stockout	150
Figura 41 – Análise de cenário para o custo logístico nos suppliers S1.1 e S1.2	151
Figura 42 – Termos significativos para o custo logístico total	153
Figura 43 – Termos significativos para o risco de stockout	154
Figura 44 – Análise residual para o custo logístico total	157
Figura 45 – Análise residual para o risco de stockout	159
Figura 46 – Gráficos de contorno para as variáveis de resposta	160

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 47 – Gráficos de superfície para as respostas	161
Figura 48 – Gráficos de contorno sobrepostos	161
Figura 49 – Parametrização das variáveis de controle	164
Figura 50 – Monitoramento do risco de stockout e custo logístico	166

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Publicações nos temas	21
Tabela 2 – Número de artigos publicados por base de dados	21
Tabela 3 – Dimensionamento de réplicas para as variáveis	131
Tabela 4 – Análise de correlação e regressão sobre o fill-Rate	139
Tabela 5 – Valores mínimos e máximos dos estoques em unidades	139
Tabela 6 – Matriz de relação causal	141
Tabela 7 – Representação dos cenários	149
Tabela 8 – Síntese de cenários e parâmetros	152
Tabela 9 – Parâmetros do metamodelo para o custo logístico total	156
Tabela 10 – Parâmetros do metamodelo para o risco de stockout	158
Tabela 11 – Configurações sugeridas pelo modelo de otimização	164

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Lacunas identificadas na literatura	23
Quadro 2 – Aspectos-chave em SCM	28
Quadro 3a – Abordagens para SCM parte 1	29
Quadro 3b – Abordagens para SCM parte 2	30
Quadro 4 – Segmentação logística	33
Quadro 5 – Processos logísticos	34
Quadro 6 – Decisões logísticas	35
Quadro 7 – Definições sobre gestão de riscos em cadeias de suprimentos	42
Quadro 8 – Objetivos da gestão de riscos em cadeias de suprimentos	43
Quadro 9 – Benefícios gerados pela gestão de riscos em cadeias de suprimentos	44
Quadro 10 – Princípios da gestão de riscos em cadeias de suprimentos	45
Quadro 11 – Modelos de gestão de riscos em cadeias de suprimentos	46
Quadro 12 – Medidas de risco em cadeias de suprimentos	48
Quadro 13 – Gaps e destaques sobre riscos logísticos	57
Quadro 14 – Etapas úteis à implantação da modelagem e simulação	61
Quadro 15 – Simulação em cadeias de suprimentos segundo o WinterSim	64
Quadro 16 – Abordagens sobre otimização	65
Quadro 17 – Conceitos das abordagens sobre otimização	66
Quadro 18a – Métodos de otimização parte 1	66
Quadro 18b – Métodos de otimização parte 2	67
Quadro 19a – Metamodelos, riscos e cadeias de suprimentos parte 1	70
Quadro 19b – Metamodelos, riscos e cadeias de suprimentos parte 2	71
Quadro 20 – Etapas do método	81
Quadro 21 – Diferenças entre as abordagens de pesquisa	85
Quadro 22 – Uma classificação para riscos logísticos	100
Quadro 23 – Subcategorias de potenciais riscos logísticos	101
Quadro 24 – Medidas de risco	102
Quadro 25 – Ferramentas para a avaliação de riscos logísticos	105
Quadro 26a – Estratégias de solução para riscos logísticos parte 1	106
Quadro 26b – Estratégias de solução para riscos logísticos parte 2	108
Quadro 27 – Ferramentas para a gestão de riscos logísticos	110
Quadro 28a – Configuração e escopo da cadeia automotiva portuguesa parte 1	117
Quadro 28b – Configuração e escopo da cadeia automotiva portuguesa parte 2	118
Quadro 29 – Configuração do sistema logístico	119
Quadro 30 – Decisões logísticas	119
Quadro 31 – Simbologia IDEF-SIM	125
Quadro 32 – Natureza dos inputs	126
Quadro 33 – Procedimentos de verificação	132
Quadro 34 – Procedimentos de validação	134
Quadro 35 – Planejamento experimental para as estratégias de resposta	148

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Função intensidade do risco	36
Equação 2 – Custo logístico total	120
Equação 3 – Risco de stockout	121
Equação 4 – Taxa fill-rate	136
Equação 5 – Confiabilidade baseada na taxa fill-rate	140
Equação 6 – Modelo de regressão linear múltipla	155
Equação 7 – Modelo de regressão expandido	155
Equação 8 – Valor esperado obtido via modelo de regressão para o custo logístico	156
Equação 9 – Valor esperado obtido via modelo de regressão para o risco de stockout	159
Equação 10 – Função geral objetivo do modelo de otimização	162
Equação 11 – Função geral das restrições do modelo	162
Equação 12 – Função objetivo designada	162
Equação 13 – O custo logístico como restrição do modelo	162
Equação 14 – Restrição para o estoque inicial de M6 no supplier 1.2	162
Equação 15 – Restrição para o estoque inicial de M6 no supplier 1.1	162
Equação 16 – Restrição para a capacidade de distribuição de C3 no supplier 1.2	162
Equação 17 – Restrição para o intervalo de distribuição C3 no supplier 1.2	162
Equação 18 – Restrições para as variáveis inteira mistas	162

# LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3/4/5 PSLs	Provedores de serviços logísticos
ABC	Custeio baseado em atividades
AD/AN	Axiomático descritivo/Axiomático normativo
AHP/ANP	Análise hierárquica de processo/
ALARP	As low as reasonable possible
ANOVA	Análise de variância
APICS	Association for Supply Chain Management
APIOBPCS	Automatic pipeline inventory and order based production control system
APS	Sistemas avançados de planejamento e programação da produção
BaR	Balance-at-Risk
BOM	Lista de materiais (Árvore do produto)
BPM	Mapeamento dos processos de negócios
BSC	Balanced Scorecard
CC	Coefficientes codificados
CNC	Coefficientes não codificados
CPFR	Planejamento colaborativo de vendas e reposição
CRM	Gestão de relacionamento com o cliente
CSCMP	Conselho de Profissionais de Gestão de Cadeias de Suprimentos
CSs	Cadeias de suprimentos
CVaR	Conditional Value-at-Risk
DaR	Demand-at-Risk
DEA	Análise envoltória de dados
DEMATEL	Decision Making Trial and Evaluation Laboratory
DET	Determinístico
DEX	Decision Expert
DMAIC	Metodologia de melhoria contínua
DOE	Projeto de experimentos
DR	Downside Risk
E	Estratégico
eDR	Expected Downside Risk
ELECTRE	Elimination et Choix Traduisant la Réalité
ED/EN	Empírico descritivo/Empírico normativo
ERM	Gestão de riscos empresariais
ERMET	Método de gestão de riscos da Ericsson
ERP	Planejamento dos recursos empresariais
EST	Estocástico
EWMA	Método da média móvel exponencialmente ponderada
FIFO	Primeiro que entra é o primeiro que sai
FIS	Fuzzy Inference Systems
FMEA/FMECA	Análise dos modelos e efeitos/criticidade de falhas
GIS	Sistema de informação geográfica
GRSCSs	Gestão de riscos em cadeias de suprimentos
GRG	Gradiente reduzido generalizado
HK	Here and Know
I/O	Entrada/saída

# LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IaR	Inventory-at-Risk
IC	Intervalo de confiança
IDEF-SIM	Modelagem gráfica para simulações
IoT	Internet das coisas
ISO	International Organization for Standardization
JIT	Just in time
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
KPIs	Indicadores chave de desempenho
KS	Kolmogorov-Smirnov
LING P	Linguagem de programação
LSSVM	Least Square Support Vector Machine
MACBETH	Measuring Attractiveness by Categorical Based Evaluation Technique
MAGIQ	Multi-attribute global inference of quality
MAUT	Multi-attribute utility theory
MAX	Máximo
MCDM	Métodos multicritério de apoio à decisão
MIA	Análise marginal incremental
MICMAC	Análise estrutural prospectiva
MILP/MINLP	Programação linear/não linear inteira mista
MIN	Mínimo
MIP	Programação inteira mista
MM	Metamodelo
MQB	Multiple Queen-Bee
MSR	Metodologia de superfície de resposta
MTO	Make to stock
O	Operacional
OLS	Métodos dos mínimos quadrados
OvS	Otimização via simulação
$P_n$	Perda
PAPRIKA	Potentially All Pairwise Rankings of all possible Alternatives
PDCA	Planejar, executar, verificar e agir
PN	Redes de Petri
POPIM	Software usado em simulação
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations
PSO	Particle Swarm Optimization
QD	Quantidade distribuída
QP	Quantidade pedida
QR	Resposta rápida ao consumidor
RADL	Radio Access Definition Language
RFID	Identificação por rádio frequência
RL	Risco logístico
RWISE	Reference World Information and Simulation Environment
SBA	Simulação baseada em agentes
SBELP	Scenário-Based E-Learning Products/Tools
SC	Simulação contínua

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SCM	Gestão da cadeia de suprimentos
SCOR	Supply Chain Operations Reference Model
SD	Sistemas dinâmicos
SED	Simulação a eventos discretos
S&O	Simulação e otimização
SIL	Sistema de informação logística
SIMAN	Simulation Software for General Purpose Languages
SIPOC	Supplier, input, process, output, customer
SMC	Simulação de Monte Carlo
SMD	Sistema de medição de desempenho
SN	Simulação numérica
SOO	Simulação orientada a objetos
SRM	Gestão de relacionamentos com o fornecedor
SvO	Simulação via otimização
T	Tático
TI	Tecnologia de informação
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
TQM	Gestão da qualidade total
VaDR	Value-at-Downside Risk
VaR	Value-at-Risk
VBA	Visual basic for applications
VIF	Inflação da variância
VMI	Estoque gerenciado pelo fornecedor
WS	Wait and See

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	Contextualização	16
1.2	Delimitações do objeto de estudo	19
1.3	Justificativas e problematização	22
1.3.1	Lacunas científicas e originalidade	22
1.3.2	Contextualização do problema	23
1.4	Objetivos	24
1.5	Estrutura da tese	25
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>26</b>
2.1	Cadeias de suprimentos, gestão e desempenho	26
2.1.1	Cadeias de suprimentos	26
2.1.2	Gestão da cadeia de suprimentos	27
2.1.3	Desempenho em cadeias de suprimentos	30
2.2	Operações logísticas em cadeias de suprimentos	32
2.2.1	Importância, evolução e escopo	32
2.2.2	Áreas da logística	33
2.2.3	Sistema logístico e processos	33
2.2.4	Decisões logísticas	34
2.3	Riscos em cadeias de suprimentos	35
2.3.1	Risco, incerteza e vulnerabilidade	36
2.3.2	Evento, fonte e consequências dos riscos	37
2.3.3	Responsabilidade, nível decisório e atitude ao risco	38
2.4	Gestão de riscos em cadeias de suprimentos	40
2.4.1	Razões para gerenciar os riscos	40
2.4.2	Conceitos sobre gestão de riscos em cadeias de suprimentos	41
2.4.3	Objetivos, benefícios e princípios da gestão de riscos	43
2.4.4	Modelos focados na gestão de riscos	45
2.4.5	O processo de gestão de riscos em cadeias de suprimentos	47
2.5	Riscos logísticos	52
2.5.1	Importância dos riscos logísticos	52
2.5.2	Estado da arte	53
2.5.3	Gestão de riscos logísticos	54
2.6	Simulação, otimização e modelagem	57
2.6.1	Caracterização dos modelos quantitativos	57
2.6.2	Simulação em cadeias de suprimentos	59
2.6.3	Otimização em cadeias de suprimentos	64
2.6.4	Simulação e otimização em cadeias de suprimentos	69
2.6.5	Metamodelagem, riscos e cadeias de suprimentos	75
2.7	Conclusões do capítulo	78
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b>	<b>79</b>
3.1	Classificação da pesquisa	79
3.1.1	Natureza da pesquisa	79
3.1.2	Abordagem do problema	79
3.1.3	Objetivos propostos	79
3.1.4	Método aplicado	80
3.1.5	Aspectos técnicos	81

<b>3.2</b>	<b>Justificativa do método selecionado</b>	<b>82</b>
<b>3.3</b>	<b>Objeto de estudo</b>	<b>83</b>
3.3.1	Estudo de caso e modelo referencial	83
3.3.2	Distinções entre as pesquisas	84
<b>3.4</b>	<b>Procedimentos metodológicos</b>	<b>86</b>
<b>3.5</b>	<b>Conclusões do capítulo</b>	<b>92</b>
<b>4</b>	<b>SISTEMÁTICA METODOLÓGICA</b>	<b>93</b>
<b>4.1</b>	<b>Frameworks para a gestão de riscos logísticos</b>	<b>93</b>
<b>4.2</b>	<b>Detalhamento das fases da sistemática</b>	<b>95</b>
4.2.1	Identificação do risco logístico (Definir)	95
4.2.2	Avaliação do risco logístico (Medir e analisar)	102
4.2.3	Gestão do risco logístico (Melhorar)	106
4.2.4	Monitoramento do risco logístico (Controlar)	110
<b>4.3</b>	<b>Limitações da sistemática proposta</b>	<b>112</b>
<b>4.4</b>	<b>Escopo, extensão e profundidade do modelo de gestão</b>	<b>113</b>
<b>4.5</b>	<b>Contribuições científicas da pesquisa</b>	<b>113</b>
<b>4.6</b>	<b>Conclusões do capítulo</b>	<b>114</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>116</b>
<b>5.1</b>	<b>Identificação do risco logístico (Definir)</b>	<b>116</b>
<b>5.2</b>	<b>Avaliação do risco logístico (Medir e analisar)</b>	<b>121</b>
5.2.1	Modelagem conceitual	121
5.2.2	Modelagem dos dados de entrada	126
5.2.3	O modelo de simulação	127
5.2.4	Verificação e validação	132
5.2.5	Análise dos outputs do modelo	145
5.2.6	Estratégias de resposta	147
<b>5.3</b>	<b>Gestão do risco logístico (Melhorar)</b>	<b>148</b>
5.3.1	Projeto e análise de cenários	148
5.3.2	O metamodelo de simulação	153
5.3.3	O modelo de otimização	160
<b>5.4</b>	<b>Monitoramento do risco logístico (Controlar)</b>	<b>166</b>
<b>5.5</b>	<b>Conclusões do capítulo</b>	<b>167</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>168</b>
<b>6.1</b>	<b>Verificação dos objetivos e respostas às questões de pesquisa</b>	<b>168</b>
<b>6.2</b>	<b>Contribuições da tese</b>	<b>169</b>
<b>6.3</b>	<b>Sugestões para pesquisas futuras</b>	<b>170</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>171</b>
	<b>APÊNDICE A – IDEF-SIM do supplier 1.3</b>	<b>192</b>

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

---

## 1.1 Contextualização

Cadeias de suprimentos (CSs) representam um arranjo empresarial cujo segmento de negócios é caracterizado por relações complexas, dinâmicas e por vezes conflitantes. Para o *Council of Supply Chain Management Professionals – CSCMP* (2013) as CSs são delineadas a partir da aquisição de matérias-primas não processadas à entrega e uso de produtos acabados pelos clientes finais, interligando empresas e incluindo troca de materiais e informações no processo logístico. Em razão dos impactos provocados e de suas implicações práticas, o tema “risco” tem despertado a atenção de empresas, organizações e pesquisadores. Atentados como os de setembro/2001 nos Estados Unidos, ou a catástrofe da usina de *Chernobyl* na Ucrânia podem desencadear danos sobre as operações das CSs.

Para Harland, Brenchley e Walker (2003, p. 52) o risco representa “a probabilidade de perda e a relevância desta perda para a organização ou indivíduo”. Esta definição se estende às CSs quando elas se expõem a um evento que pode provocar rupturas de fluxos entre os diferentes membros (GHADGE; DANI; KALAWSKY, 2012), afetando o desempenho e a eficiência na gestão destes arranjos. Impactos inesperados ou condições que negativamente influenciam qualquer parte da CS (HO et al., 2015) sugerem eventos probabilísticos que demandam dos gestores habilidades e ferramentas gerenciais para para melhor lidar com os riscos, conforme os danos potenciais que podem ocorrer.

Para Kleindorfer e Saad (2005) e Tomlin (2006) alguns tipos de riscos podem causar rupturas nos fluxos de materiais e produtos nas CSs, os chamados riscos de rupturas. Tais fluxos estão sob o escopo da logística, que “é a parte da gestão da CS que planeja, implanta e controla a eficiência e efetividade dos fluxos direto e reverso e a armazenagem de bens, serviços e informações correlatas entre o ponto de origem e consumo para atender às necessidades dos clientes (CSCMP, 2013, p. 117)”. Outros riscos são inerentes ao funcionamento dos arranjos, conhecidos como riscos operacionais, e podem afetar a cadeia logística (CHEN; SOHAL; PRAJOGO, 2013; SINGH; MISHARA; JAIN, 2012). Os riscos adjacentes ou subjacentes ao sistema logístico podem produzir graves distúrbios na coordenação e integração dos fluxos (financeiro, informacional, material, bens acabados, reverso).

Os riscos logísticos (RLs) se relacionam às falhas nos processos de transporte, armazenagem, produção e vendas ocasionadas pela não cooperação entre membros da CS (CHEN; YUAN, 2009), sendo a sua gestão um fator crítico para a integração dos fluxos sob a responsabilidade da área de logística, ou de provedores de serviços logísticos (PSLs), conhecidos como 3PLs - *Third-Party Logistics Service Providers* ou operadores logísticos. Essas empresas fornecem serviços logísticos para CSs ou organizações com demandas específicas nesta área (ROY; SENGUPTA, 2018).

O elevado *mix* de serviços tem estimulado operadores logísticos a transferir suas atividades para outras organizações, quarteirizando (4PLs) ou quinteirizando (5PLs) alguns processos. Os operadores 4PLs são empresas que não detêm ativos, mas que utilizam seus recursos e soluções baseadas em tecnologia de informação para planejar e projetar CSs, atuando como elo entre o cliente e múltiplos provedores logísticos (SELVIARIDIS; SPRING, 2007). Já os provedores 5PLs, chamados de quinta geração, contratam os 4PLs e são responsáveis pelo projeto e implantação de redes de CSs com amplo foco no comércio eletrônico, na inovação e na gestão estratégica do sistema logístico (HOSIE et al., 2012). Esse processo de terceirização ao longo dos anos pode desencadear riscos no desempenho das operações logísticas.

Modelos de avaliação de desempenho como o *Supply Chain Operations Reference Model – SCOR®*, versão 12, (APICS, 2017) e o *Global Supply Chain Forum* (LAMBERT; COOPER; PAGH, 1998) apresentam métricas que podem sinalizar efeitos de riscos sobre operações de CSs. Ritchie e Brindley (2007) destacam a relevância de mensurar e gerenciar os riscos em CSs a partir de direcionadores e ações eficientes de mitigação. Isso sugere um maior enfoque na medição do risco e avaliação de seus impactos sobre o desempenho das operações, o que indica a adoção de práticas de gestão para lidar com vulnerabilidades causadas pelos riscos.

A gestão de riscos assume uma visão estratégica e integrada (McSHANE, 2018) por meio de uma sistemática coordenada para identificar, avaliar e priorizar os riscos relacionados a uma aplicação econômica de recursos para minimizar, monitorar e controlar a probabilidade e/ou impacto de eventos (TRKMAN; OLIVEIRA; MCCORMACK, 2016). Todavia, a gestão mais tradicional de riscos não se adequa às necessidades das CSs (JÜTTNER, 2005), uma vez que o conceito de SCM (*Supply Chain Management*) demanda uma visão transversal da gestão de riscos (GAUDENZI; BORGHESI, 2006; SCANNELL et al., 2013). Assim, a gestão de riscos em CSs (GRCSs) é uma linha de pesquisa interessante focada no contexto desses arranjos.

Segundo Christopher e Lee (2004), a GRCSs, como parte do SCM, trata os riscos a partir de técnicas, atitudes e estratégias de resposta (LAVASTRE; GUNASEKARAN; SPALANZANI, 2012), cujo objetivo é analisar e evitar, por exemplo, impactos provenientes de desastres ou de rupturas nos fluxos de negócios em CSs (NORRMAN; JANSSON, 2004). Sodhi, Son e Tang (2012) destacam a falta de consenso sobre a definição GRCSs, a ausência de pesquisas robustas e empíricas no tema e a necessidade de maturação dessas abordagens de gestão, já que se trata de um tópico emergente que tem recebido atenção de profissionais, empresas e acadêmicos. Para Norrman e Lindroth (2002), a função logística é um componente da GRCSs e lida com os riscos causados pelas atividades e recursos do sistema logístico (COOPER; LAMBERT; PAGH, 1997; MENTZER et al., 2001).

Contribuições observadas em Elleuch, Hachicha e Chabchoub (2013), Manuj, Esper e Stank (2014) e Tummala e Schoenherr (2011) focadas em GRCSs têm sido propostas nos últimos 15 anos para mitigar riscos, inclusive envolvendo temas tão contemporâneos, tais como: *Big Data*, Internet das Coisas – IoT e Indústria 4.0 (TSANG et al., 2018). A seleção apropriada de estratégias de respostas aos riscos em CSs depende dos mecanismos de mitigação propostos pelas abordagens de gestão. A mitigação de riscos e suas estratégias se propõem a reduzir os efeitos e/ou probabilidades de ocorrência do risco sobre o desempenho de CSs. Sistemas de medição de desempenho (SMD) e seus indicadores podem capturar a criticidade dos riscos.

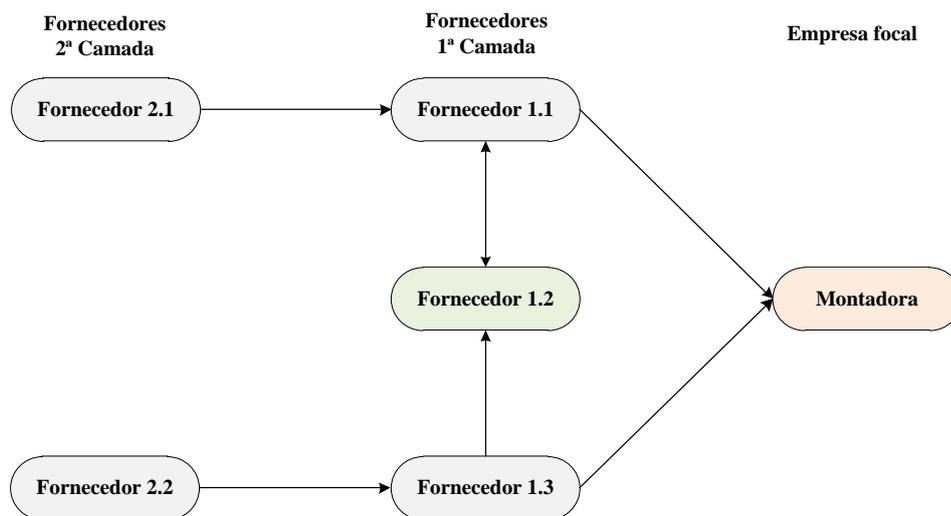
A relação entre objetivos e estratégias de resposta pode ser balanceada por meio de métodos de otimização para selecionar formas eficientes de lidar com riscos em CSs (TALLURI et al., 2013). Os métodos de simulação e otimização podem ajudar na análise dos impactos sobre as operações do sistema logístico em CSs (PETERSEN; LEMKE, 2015). A simulação poderia reproduzir comportamentos probabilísticos dos riscos, sugerindo alternativas adequadas para mitigar riscos danosos ao arranjo. Ye e You (2016) destacam que a combinação simulação - otimização é largamente usada para melhorar o desempenho de estoques sob incerteza.

Modelos multiobjetivos criados a partir da simulação - otimização podem mitigar rupturas no processo de transporte (CHÁVEZ et al., 2017), reduzir custos e maximizar a confiabilidade de entregas de fornecedores sob riscos (VENKATESAN; KUMANAN, 2012), testar estratégias eficientes em custos (GE et al., 2016), entre outras aplicações. Nesta tese foram implantados estágios da GRCSs guiados por uma sistemática metodológica que faz uso de um metamodelo de simulação para fins de melhoria de desempenho na CS estudada.

## 1.2. Delimitação do objeto de estudo

A partir de uma pesquisa na literatura sobre modelos de simulação baseados em CSs reais, um caso sobre uma cadeia automotiva de Portugal foi escolhido como objeto de estudo desta tese, precisamente o sistema logístico deste arranjo, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Delimitação do objeto de estudo



Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2012)

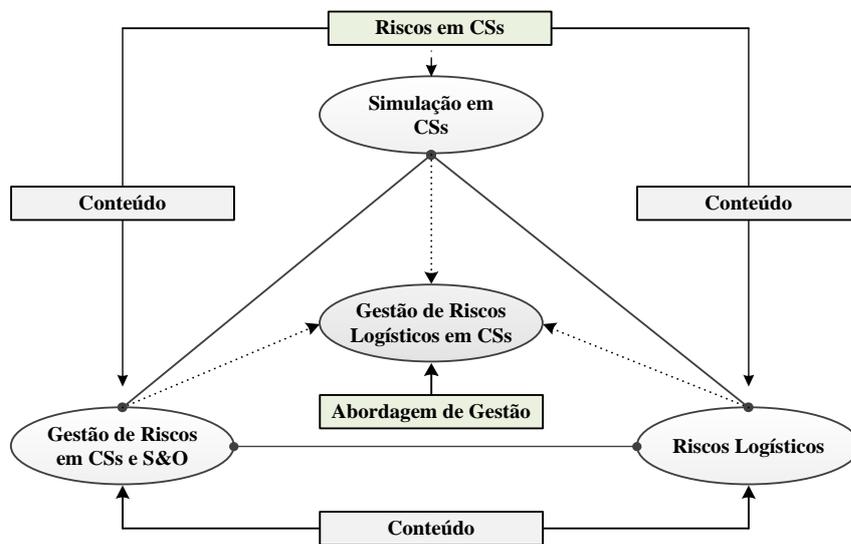
A Figura 1 ilustra o modelo de Carvalho et al. (2012), selecionado como base para testar e validar a sistemática metodológica proposta. O modelo representa uma parte de uma CS real do segmento automotivo especializada na produção de subconjuntos de peças. Para escolher o objeto de estudo como sendo o sistema logístico dessa CS, buscou-se na literatura um estudo de caso que envolvesse um modelo de simulação devidamente validado compreendendo dois ou mais elos do arranjo. Adicionalmente, determinou-se como critério, um modelo que usasse o SCOR<sup>®</sup> para fins de mapeamento dos processos de negócios e avaliação de desempenho.

Delimitando ainda o objeto de estudo, os processos do modelo SCOR<sup>®</sup> considerados foram o planejamento (*Plan*), produção (*Make*), distribuição (*Deliver*), e suprimentos (*Source*). Nesse sentido, os processos relacionados ao sistema logístico foram: movimentação e armazenagem, gestão de estoques, separação, transporte/entrega, embalagem (unitização e desunitização) e recepção e inspeção de componentes. Além destas considerações ao modelo de Carvalho et al. (2012) foram inseridos alguns elementos, tais como: sistema de custo logístico, dinâmicas de RLs, SMD e KPIs (indicadores chave de desempenho) focados em riscos.

Para fins dessa tese, considerou-se que as operações do sistema logístico são executadas por PSLs, apesar do modelo de Carvalho et al. (2012) não mencionar as interações com esses prestadores de serviços. Os PSLs têm exercido um papel importante para organizações que subcontratam operações logísticas. Os dados da Armstrong & Associates (2018) mostram que de aproximadamente 80 trilhões de dólares do Produto Interno Bruto dos países em 2017, a receita dos 3PLs representa em média 9,9% deste montante. Este número mostra a relevância do setor.

A partir do trabalho dessa tese, duas revisões sistemáticas de literatura (OLIVEIRA; LIMA; MONTEVECHI, 2016; OLIVEIRA et al., 2019) foram publicadas nos tópicos: simulação em CSs e GRCSs baseada em métodos de simulação e otimização. Conforme a Figura 2, RLs foi outro eixo de pesquisa incluído, cujo foco foi avaliar procedimentos para gerenciar riscos em sistemas logísticos.

Figura 2 – Grandes eixos de pesquisa



Fonte: Produção do próprio autor

Diversas bases de dados com artigos indexados foram utilizadas para posicionar o objeto de estudo entre os grandes eixos de pesquisa e assim, determinar oportunidades de investigação a serem exploradas. Entre as principais bases de pesquisas destacam-se a Taylor & Francis, Web of Science, Compendex e Scopus.

A Tabela 1 mostra a quantidade de artigos publicados nos últimos 35 anos sobre os tópicos, sendo que 1.317 artigos foram registrados no tema riscos em CSs. Este número foi reduzido para 641 artigos quando envolveu GRCSs. Todavia, quando são acrescentados os tópicos RL, simulação e otimização, nenhum artigo foi registrado. A partir da terceira coluna, a interseção entre dois temas representa o número de artigos observados. Portanto, é possível observar a incipiência de artigos sobre RL. Apenas um trabalho relacionou RL e otimização (YAN; YUAN, 2010). Entretanto, não houve menções às CSs como objeto de estudo.

Tabela 1 – Publicações nos temas

Artigos	Tema	RCS	GRCS	RL	Simulação	Otimização
1.317	RCS	-	483	0	43	19
641	GRCS	483	-	0	17	15
0	RL	0	0	-	0	1
0	Simulação	43	17	0	-	Não investigado
0	Otimização	19	15	1	Não investigado	-

Nota: RCS (Riscos em cadeias de suprimentos)

Fonte: Produção do próprio autor

A Tabela 2 detalha o número de artigos por base, mostrando a escassez de trabalhos nos temas RL, simulação e otimização. O software MS Excel<sup>®</sup> foi utilizado para tabular os dados sobre os artigos.

Tabela 2 – Número de artigos publicados por base de dados

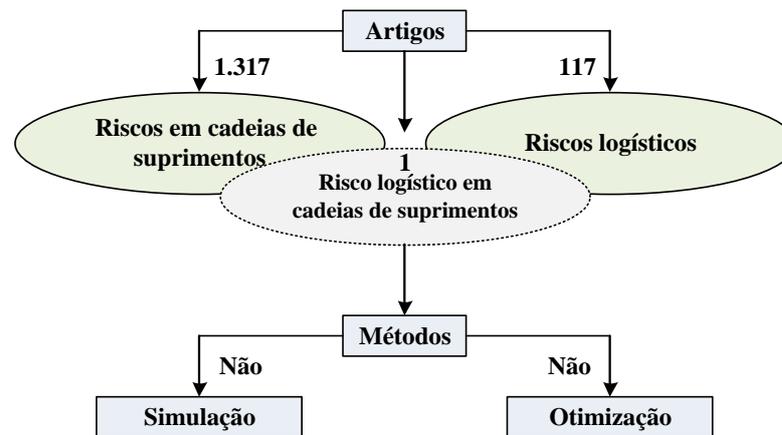
Bases de indexação	P/AE	RCS	GRCS	RL	S	O
ACS Publications	P	-	-	-	-	-
Compendex - Engineering Village	P/AE	224	95	-	-	-
DOAJ	P	12	7	-	-	-
EBSCO	P	24	9	-	-	-
Emerald Insight	P	39	28	-	-	-
Gale Academic Onfile	P	43	20	-	-	-
Sage Crossref	P	2	1	-	-	-
Science Direct	P	47	20	-	-	-
Scopus	P/AE	386	159	-	-	-
Springer Link	P	14	11	-	-	-
Taylor & Francis	P	283	179	-	-	-
Web of Science	P/AE	197	98	-	-	-
Wiley Online Library	P	46	14	-	-	-
<b>Total</b>		<b>1.317</b>	<b>641</b>	-	-	-

Nota: DOAJ (Directory of Open Access Journals); P (Periódico); AE (Anais de evento); S (Simulação); O (Otimização)

Fonte: Produção do próprio autor

De acordo com a Figura 3, os artigos publicados no tema risco somam 1.317. No tema RL há 117 trabalhos. Contudo, apenas Cavinato (2004) envolve RLs em CSs.

Figura 3 – Escassez de trabalhos sobre risco logístico em cadeias de suprimentos



Fonte: Produção do próprio autor

Cavinato (2004) abordou o tópico RL focando seus desenvolvimentos em constructos internos às CSs, mas sem aplicar métodos de simulação e otimização. As evidências apontaram para a consideração de duas linhas potenciais de pesquisa: (a) a relação de RLs em CSs; e (b) o uso dos métodos de simulação no tema principal do estudo. A partir de uma análise na literatura sobre os tópicos já mencionados, o escopo da pesquisa foi reduzido para incluir os seguintes aspectos:

- sistemas de medição de desempenho em cadeias de suprimentos;
- o modelo de gestão SCOR<sup>®</sup> desenvolvido pela APICS (2017);
- provedores de serviços logísticos;
- procedimentos sistemáticos para a gestão de riscos logísticos em cadeias de suprimentos;
- o uso combinado da otimização via simulação (OvS).

### 1.3 Justificativas e problematização

Esta seção apresenta as motivações para esta pesquisa e a contextualização do problema a ser explorado nesta tese.

#### 1.3.1 Lacunas científicas e originalidade

A partir de uma análise sobre a revisão sistemática de literatura detalhada no Capítulo 2, o Quadro 1 ilustra algumas das relevantes lacunas ou *gaps* não preenchidos por outros autores.

Quadro 1 – Lacunas identificadas na literatura

Aspecto	Lacunas
Riscos Logísticos	Falta de uma abordagem sistemática associada às potencialidades dos métodos de simulação e otimização para gerenciar riscos logísticos em CSs.
OvS	A combinação da simulação a eventos discretos e o método de otimização NBI - <i>Normal Boundary Intersection</i> , entre outras abordagens otimizantes.
PSL (3PL/4PL/5PL)	Inexistência de procedimentos integrados para gerenciar riscos na perspectiva dos provedores de serviços logísticos.
SMD	Ausência de mecanismos apropriados para integrar KPIs e medidas de riscos a um sistema de mensuração de desempenho logístico focado nas operações dos PSLs.
SCOR®	Não utilização dos fundamentos do modelo SCOR® para modelar processos na CSs e apoiar a elaboração de um sistema híbrido de desempenho focado em KPIs de riscos.

Fonte: Produção do próprio autor

Este trabalho de tese não pretende preencher todos os *gaps*, mas atender às necessidades em torno dos principais eixos de pesquisa. Ou seja, a gestão de RLs, a modelagem combinada de métodos de simulação e otimização, a inserção de um SMD para sinalizar os efeitos dos riscos na cadeia e a abordagem SCOR® para modelar processos e auxiliar na criação de indicadores baseados em RLs. Portanto, esta pesquisa se diferencia dos demais trabalhos acadêmicos na medida em que ela integra, em uma mesma abordagem, tais perspectivas, podendo contribuir para o processo de tomada de decisão com base nos efeitos produzidos pelos RLs em CSs.

### 1.3.2 Contextualização do problema

O nível de serviço ao cliente final pode ser afetado pelos efeitos dos RLs, frequentemente provocados por rupturas no fluxo físico de produtos ou de informação. Isso demanda medidas para analisar e tratar os impactos destes eventos de riscos. Lin, Ren e Wang (2016) utilizaram a simulação de sistemas dinâmicos para avaliar os efeitos de riscos operacionais e cenários de mitigação em uma CS. A simulação baseada em agentes foi aplicada por Wu, Blackhurst e Chidambaram (2006) para investigar *stockouts* (falta de estoque) no varejo e analisar políticas de estoque e riscos de ruptura via balanceamento.

Os impactos sinalizam vulnerabilidades nas CSs ou severidades causadas pela ocorrência dos riscos caso ocorram. A avaliação da criticidade dos efeitos desses riscos sobre o desempenho das CSs (Kouvelis et al., 2012) podem contribuir para que os níveis de incerteza nos arranjos sejam reduzidos, a depender da estratégia de mitigação aplicada. Normalmente, os impactos desses riscos são analisados a partir de dimensões financeiras, sendo custos e riscos uma das mais observadas na literatura (NAGURNEY; NAGURNEY; LI, 2015).

Mensurar e analisar as perdas relacionadas aos RLs e impactos sobre o desempenho da CS a partir dos métodos de simulação e otimização parece ser uma interessante linha de pesquisa. Nesse contexto, a primeira questão de pesquisa desta tese é: **quais os impactos dos riscos logísticos sobre o desempenho da cadeia de suprimentos em estudo?**

As modelagens matemáticas e métodos de otimização podem apoiar a criação de mecanismos de mitigação e estratégias de resposta para minimizar as consequências dos riscos. Esta linha de abordagens analíticas tem sido amplamente aplicada (JEONG; HASTAK; SYAL, 2006; KENGPOL; TUAMMEE, 2015) em problemas de configuração de redes logísticas e de CSs sob a influência de riscos. O projeto dessas redes de suprimentos representa uma forma de mitigação de riscos, uma vez que os métodos de otimização contribuem para a estimação de parâmetros relacionados às variáveis de decisão, contribuindo para o (re) dimensionamento de cadeias menos vulneráveis.

Considerando que abordagens mais analíticas, frequentemente, desconsideram as interações dinâmicas nas CSs, os modelos de simulação parecem mais apropriados para lidar com essa complexidade. Além disso, eles podem ser parametrizados pelos modelos de otimização para produzir resultados mais robustos. O uso integrado da simulação e otimização pode melhorar o desempenho de sistemas logísticos em CSs, ajudando a reduzir os efeitos de riscos críticos. Diante do contexto que foi exposto sobre riscos em CSs, a segunda problemática de pesquisa trata da configuração de parâmetros apropriados capazes de mitigar os efeitos dos impactos de RLs sobre o comportamento da CS. KPIs indexados ao SMD devem sinalizar se as estratégias de resposta (contramedidas) afetadas pela nova parametrização das variáveis independentes surtirão efeito, particularmente em torno dos resultados gerados pelo modelo de simulação.

A segunda questão de pesquisa é: **sob a influência de riscos logísticos, que configuração ou ajustes no sistema logístico poderá melhorar o desempenho da cadeia de suprimentos em estudo?** A resolução dessa problemática induz o uso dos métodos de simulação e otimização de forma a se criar formas mais eficientes de mitigar os impactos causados pelos riscos.

## 1.4 Objetivos

Os métodos de otimização podem sugerir parametrizações para os modelos de simulação que produzam maiores níveis de eficiência.

O objetivo desta tese é: **mitigar os efeitos de riscos logísticos numa cadeia de suprimentos a partir da elaboração de um metamodelo de simulação para otimização de parâmetros.**

Esses parâmetros regulam a operação do sistema logístico, envolvendo, por exemplo, níveis de estoques, quantidade de estoques de segurança, capacidades de armazéns e veículos de transporte, entre outros. Portanto, para viabilizar a consecução desta pesquisa, três objetivos específicos foram considerados:

- propor uma sistemática metodológica que melhore a gestão de riscos logísticos em cadeias de suprimentos;
- avaliar os efeitos da mitigação dos riscos a partir da implantação dos procedimentos contidos na sistemática proposta;
- definir uma configuração adequada para o sistema logístico da cadeia de suprimentos em estudo que melhore o desempenho das variáveis de resposta sob a influência dos riscos.

A configuração do sistema logístico significa determinar ajustes adequados para os recursos usados nas operações logísticas, como por exemplo, número de veículos de transporte, níveis de estoque, capacidade de transporte, entre outros.

## **1.5 Estrutura da tese**

Este trabalho está estruturado em mais cinco capítulos além deste introdutório: o **Capítulo 2** aborda a fundamentação teórica, evidenciando o estado da arte sobre as temáticas exploradas; o **Capítulo 3** detalha os aspectos metodológicos aplicados para atingir os resultados esperados segundo os objetivos definidos no item 1.4; o **Capítulo 4** abrange um guia de implantação da abordagem proposta; o **Capítulo 5** envolve a aplicação dos procedimentos da sistemática metodológica, a apresentação e discussão dos principais resultados; o **Capítulo 6** menciona os comentários finais sobre os principais achados desta tese. Além destas seções, as **Referências** registram as autorias e obras citadas e o **Apêndice** contém uma representação gráfica.

## CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura sobre os temas de pesquisa. A revisão feita nesta seção resultou em duas relevantes publicações (OLIVEIRA; LIMA; MONTEVECHI, 2016; OLIVEIRA et al., 2019) sobre simulação em CSs e GRCSs, simulação e otimização.

### 2.1 Cadeias de suprimentos, gestão e desempenho

Esta seção aborda três relevantes relações: o conceito e estrutura de uma CS, a visão baseada em SCM e aspectos relacionados ao processo de medição e análise de desempenho em CSs.

#### 2.1.1 Cadeias de suprimentos

Conforme Chopra e Meindl (2007), La Londe e Masters (1994) e Lumus e Vokurka (1999), o conceito de CS tem evoluído a partir dos desenvolvimentos teóricos e aplicados. Para Oliveira (2008) uma CS pode ser vista como um conjunto de cadeias de valor conectadas por relações interorganizacionais a montante e jusante da empresa líder para executar os fluxos: financeiro, de materiais, bens, serviços e informações, do primeiro fornecedor do fornecedor ao último cliente do cliente final, compreendendo o fluxo reverso de produtos e subprodutos retornáveis e/ou descartáveis, gerando-se o valor esperado pelo consumidor final.

O CSCMP (2013) conceitua a CS a partir das matérias-primas não processadas à utilização do bem pelo consumidor final, interligando conjuntamente várias empresas, incluindo a troca de materiais e informações no processo logístico, desde a aquisição das matérias-primas até a entrega dos produtos acabados ao cliente final. Não obstante a panaceia conceitual divergente, a CS se caracteriza pela organização liderada de empresas em rede; extensão de atividades de valor agregado, desde o fornecimento ao processo reverso de produtos e/ou subprodutos (e.g. devolução de um produto defeituoso); e conexão entre membros por fluxos. Para os fins desta pesquisa, o conceito de CS escolhido foi baseado em Oliveira (2008), a partir da inserção das contribuições de Porter (1985) sobre cadeias de valor.

Os modelos SCOR<sup>®</sup> e do *Global Supply Chain Forum* podem ser usados para modelar CSs e seus processos de negócios em atendimento à demanda de consumidores. O SCOR<sup>®</sup> inclui os processos planejamento, suprimentos, produção, distribuição, retorno e suporte à decisão.

Mais três módulos fazem parte do modelo SCOR<sup>®</sup>: desempenho (métricas de desempenho), práticas (práticas de gestão) e pessoas (definições para as habilidades dos colaboradores). Estruturas complexas como CSs demandam abordagens de gestão específicas para alavancar os níveis de serviços exigidos por consumidores e clientes finais. Um dos grandes enfoques gerenciais é o conceito de SCM.

### **2.1.2 Gestão da cadeia de suprimentos**

Imputam-se as primeiras menções ao conceito SCM a Houlihan (1985) ou Oliver e Webber (1982). No entanto, as pesquisas de Forrester (1961) sobre o efeito chicote parecem ter sido as pioneiras sobre a origem conceitual do termo. SCM não se confunde com logística, pois ele tem amplo escopo (COOPER; LAMBERT; PAGH, 1997) na medida em que os processos de negócios, complementares e transversais à função logística, se estendem a toda CS, os quais são ligados por fronteiras intra e interorganizacionais.

Bowersox, Closs e Cooper (2012) definem SCM como empresas colaborando para alavancar o posicionamento estratégico e melhorar a eficiência operacional. A logística está associada à movimentação, posicionamento de estoques e produção de valor em termos de tempo. Para os autores, operações em CSs exigem processos gerenciais que perpassam áreas funcionais entre as empresas, ligando parceiros e consumidores através de fronteiras organizacionais. Portanto, a logística é um subgrupo componente do conceito SCM e de escopo mais limitado.

Segundo o CSCMP (2013) SCM abrange o planejamento e gestão de atividades envolvidas na obtenção, fornecimento, conversão e todas as atividades logísticas. Inclui a coordenação e colaboração com parceiros nos canais, que podem ser fornecedores, provedores de serviços, intermediários e clientes. Portanto, SCM é um amplo processo de gestão de negócios, cuja função logística tem, por fim, acelerar o alcance dos objetivos estratégicos da CS.

Nesta pesquisa, o conceito SCM proposto pelo CSCMP (2013) é adotado como elemento-chave para a governança em CSs. A operacionalização de modelos de gestão considera vários aspectos que são indispensáveis para configurar CSs, facilitando o processo de tomada de decisão sobre temas atinentes ao perfil destes arranjos. O Quadro 2 enumera e fornece os conceitos desses aspectos-chave.

Quadro 2 – Aspectos-chave em SCM

Aspecto	Conceito
Processos de negócios	Estrutura de atividades projetadas para a ação com foco nos consumidores finais e na gestão da dinâmica dos fluxos envolvidos de produtos, conhecimentos e/ou ideias, financeiros e informações (LAMBERT; COOPER; PAGH, 1998).
Natureza dos produtos	Escolha estratégica da CS a partir da determinação da natureza dos produtos ofertados pelas empresas (FISHER, 1997). A estrutura do produto influencia a CS (APPELQVIST; LEHTONEN; KOKKONEN, 2004).
Mapeamento estrutural	É a configuração estrutural de uma CS que envolve aspectos como elos, fluxos, papel dos membros, escopo da modelagem e o tipo de estrutura (LAMBERT; COOPER; PAGH, 1998).
Recursos	Representa os ativos, recursos e capacidades necessários ao funcionamento da CS (RUNGTUSANATHAM et al., 2003).
Integração da rede	Está associada ao nível de verticalização e interligação dos membros da CS aos processos de gestão (SRAI; GREGORY, 2008).
Fonte de suprimentos	Relaciona-se à natureza e escala da função suprimentos realizada na CS e suas relações com a produção (TRENT; MONCZKA, 2005).
Gestão de desempenho	Sistema de mensuração e avaliação de desempenho dos processos-chave de negócios, cujo foco é analisar a eficiência, eficácia e produtividade global da CS (LAMBERT; POHLEN, 2001).
Coordenação	Mecanismos de coordenação da CS e desenvolvimento de relacionamentos em torno de membros e parceiros que transacionam processos de negócios (SPEKMAN; KAMAUFF JR; MYHR, 1998).
Flexibilidade do arranjo	Capacidade da CS em responder aos requisitos demandados pelo mercado consumidor e habilidade do arranjo em alargar os negócios para atender mudanças na demanda (MASON-JONES; NAYLOR; TOWILL, 2000).
Abordagem de gestão	É a lógica do tipo de gestão empregada na condução da CS e nos processos que permeiam a perspectiva intra e interorganizacional dos membros (MANUJ; SAHIN, 2011; MENTZER et al., 2001).
Sistema de produção	Significa a estratégia de operações usada pelos sistemas de produção para processar os fluxos envolvidos na manutenção da CS (APICS, 2017).
Sistemas de informação	Interfaces baseadas em tecnologia de informação cuja função é conectar elos da CS, permitindo a coordenação de ações e obtenção prática de benefícios a partir da elevação de lucros (CHOPRA; MEINDL, 2007).
Competências essenciais	[...] habilidades, capacidades e experiências para cumprirem metas que não atingiriam facilmente se atuassem independente das empresas da CS (SPEKMAN; SPEAR; KAMAUFF, 2002).
Gestão de riscos em CSs	Procedimentos para identificar, medir, priorizar-avaliar, mitigar riscos e controlá-los através de sistemas de gestão de dados (TUMMALA; SCHOENHERR, 2011).
Projeto da rede	É a configuração e modelagem estratégica da rede de suprimentos a partir do uso de métodos matemáticos e técnicas de otimização (SANTOSO et al., 2005).

Fonte: Produção do próprio autor

Nem todas as bases conceituais expostas no quadro foram aplicadas nesta tese por não haver aderência à pesquisa. A modelagem de CSs revela interações entre os membros, permitindo uma visão planejada de sua estrutura e identificação de problemas sistêmicos. A arquitetura de CSs pode designar o formato estrutural e funcional das empresas e como elas operam seus processos-chave de negócios. Os Quadros 3a e 3b ilustram as abordagens utilizadas em cada aspecto, representando os prismas escolhidos para esta tese segundo sua relevância científica.

Anderson, Britt e Favre (2000) desenvolveram sete princípios SCM: segmentação logística, customização do sistema logístico, gestão das fontes de suprimentos, previsão e percepção da demanda, postergação, uso da TI e adoção de indicadores de desempenho. Esta pesquisa se sustenta nos pilares: segmentação logística, customização do sistema logístico e adoção dos indicadores de desempenho. A segmentação logística relaciona-se com o nicho dos 3PL's. A customização do sistema logístico foi utilizada a partir da configuração em torno das variáveis de decisão do modelo de simulação e otimização. Métricas de desempenho foram adotadas para sinalizar os impactos dos riscos sobre variáveis de resposta, sendo uma ação importante para o controle gerencial, uma vez que elas informam como os subsistemas da CS, inclusive o sistema logístico, está operando sob a influência de riscos.

Quadro 3a – Abordagens para SCM parte 1

Aspecto	Abordagens	Autoria
Processos de negócios	SCOR® (planejamento, produção, suprimentos, distribuição, retorno, suporte à decisão) e GSCF (gestão da relação com o cliente, gestão de serviços ao cliente, gestão da demanda, atendimento de pedidos, gestão do fluxo de produção, gestão da relação com fornecedores, desenvolvimento do produto e comercialização e gestão do retorno).	APICS (2017); Croxton et al (2001)
Natureza dos produtos	Produtos funcionais, produtos inovadores e ciclo de vida do produto.	Fisher (1997)
Mapeamento estrutural	Elos (matéria-prima, suprimentos, manufatura, montagem, atacadista, centros de distribuição, varejo e cliente final); vínculos gerenciais dos processos (gerenciados, monitorados, não gerenciados e não membros), função do membro (primário, secundário e empresa focal) e fluxos (bens acabados, materiais e componentes, informacional, financeiro, serviço, reverso e direto).	Dominguez, Canella e Framina (2015); Lambert, Cooper e Pagh (1998); Svanberg e Halldórsson (2013)
Recursos	Ativos (tangíveis e intangíveis) e capacidades.	Rungtusanatham et al. (2003)
Integração da rede	Vertical, horizontal, espacial, geográfica e híbrida.	Srai e Gregory (2008)
Fontes de suprimentos	Suprimento interno, terceirização, suprimento global, <i>offshoring</i> e operações compartilhadas.	Farrel (2006); Leenders e Johnson (2000); Trent e Monczka (2005)
Gestão de desempenho	Modelo SCOR®, <i>Balanced Scorecard</i> , modelo do <i>Global Supply Chain Forum</i> e abordagem Seis Sigma.	APICS (2017); Husby e Swartwood (2009); Kaplan e Norton (2006); Lambert e Pohlen (2001)
Coordenação	Relacionamentos, parcerias, mecanismos de coordenação e colaboração, decisões sobre centralização ou descentralização dos processos de gestão, governança.	Cooper e Gardner (1993); Daugherty (2011); Handfield e Bechtel (2002); Singh (2011); Spekman, Kamauff Jr. e Myhr (1998); Wathne e Heide (2014)

Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 3b – Abordagens para SCM parte 2

Aspecto	Abordagens	Autoria
Flexibilidade do arranjo	CS enxuta, CS ágil, CS <i>Leagile</i> (híbrida), CS tradicional.	Christopher e Towill (2000); Mason-Jones, Naylor e Towill (2000)
Abordagem de gestão	Níveis de maturação gerencial da CS (processos de gestão, operacionalização da filosofia SCM e filosofia gerencial) e abordagens intraorganizacional e interorganizacional.	Manuj e Sahin (2011); Mentzer et al. (2001)
Sistema de produção	<i>Make-to-Stock</i> (produzir pra estoque), <i>Make-to-Order</i> (produzir sob encomenda), <i>Assemble-to-Order</i> (Montagem sob encomenda), <i>Engineering-to-Order</i> (Projeto sob encomenda); Sistemas enxutos; puxar/empurrar a produção.	APICS (2017); Nag, Han e Yao (2014)
Sistemas de informação	Interfaces, ferramentas, tecnologias, perfil da plataforma de tecnologia de informação, softwares, <i>hardware</i> , pessoas.	Chopra e Meindl (2007); e Denolf et al. (2015)
Competências essenciais	Competências distintivas, competências qualificadoras e competências básicas.	Sangari e Razmi (2015); Vollmann, Cordon e Raabe (1996)
Gestão de riscos em CSs	ISO 31000, o modelo da Ericsson, casa do risco, SCRMP, o modelo de Manuj e Mentzer, entre outros.	Manuj e Mentzer (2008a); Norrman e Jansson (2004); Oliveira et al. (2017); Pujawan e Geraldin (2009); Tummala e Schoenherr (2011)
Projeto da rede	Classificações, modelos, modelagens, métodos e técnicas de soluções e aplicações, abordagens de otimização e configuração.	Eskandarpour et al. (2015); Farahani et al. (2014); Ghaderi, Pishvae e Moini (2016); Lemmens et al. (2016)

Fonte: Produção do próprio autor

### 2.1.3 Desempenho em cadeia de suprimentos

O alcance de objetivos estratégicos em CSs pode ser registrado pelos SMD's cujos resultados operacionais são comparados a padrões previamente estabelecidos. O processo de medição e avaliação de desempenho em CS é fundamentado em um conjunto de métricas que compõem o SMD, cujo objetivo é mensurar e analisar os resultados da implantação de ações em termos de eficiência, efetividade e eficácia. De acordo com Morgan (2004, p. 534) as “configurações de CSs emergem nos SMDs a necessidade de serem estruturados adequadamente com o fim de fornecerem rapidamente aos gerentes informações compreensíveis” a partir da eficiente gestão de informação visando melhor apoiar o processo decisório. Assim, medição quantifica resultados e avaliação compara-os enquanto métricas, a padrões de referência.

Hronec (1997) considera uma medida de desempenho como a quantificação do sucesso na execução de atividades ou a verificação de atingimento de metas. A meta representa o padrão de referência em contraste ao resultado obtido pela medida. O *gap* é o desvio em torno dessa meta. Assim sendo, as medidas de desempenho devem refletir o alinhamento entre objetivos estratégicos e os parâmetros corretivos alcançados pelos planos de melhoria contínua. Esses objetivos de desempenho podem envolver dimensões competitivas, como: custos, qualidade, tempo, flexibilidade, confiabilidade, responsividade, sustentabilidade, entre outras.

As métricas de desempenho devem ser capazes de capturar as mudanças, notadamente aquelas observadas em torno do desempenho dos processos de negócios em CSs. Diversos modelos, *frameworks*, abordagens ou sistemáticas, não necessariamente focadas em CSs, permeiam KPIs, aplicações e procedimentos de implantação sobre tópicos, tais como: Seis Sigma (YEH; CHENG; CHI, 2007); práticas e desempenho em CSs sustentáveis (SHARMA; GANDHI, 2016), ou modelagem de métricas e CSs ágeis, enxutas e *Leagile* (AGARWAL; SHANKAR; TIWARI, 2006).

Neely, Gregory e Platts (1995) conceituam um SMD como um conjunto de KPIs e suas inter-relações, abrangendo perspectivas internas, externas, financeiras e não financeiras; serem integradas horizontalmente e verticalmente; não serem conflituosas entre si e serem focadas em objetivos de curto e de longo prazo. O modelo SCOR<sup>®</sup> tem influenciado novas abordagens para os SMDs (GUNASEKARAN; PATEL; TIRTIROGLU, 2001; THAKKAR; KANDA; DESHMUKH, 2009) a partir da combinação ou adaptação de seus fundamentos. Uma das justificativas é sua perspectiva sistêmica para modelar o desempenho global em CSs. Esta tese usou o modelo SCOR<sup>®</sup> para projetar um SMD focado em operações logísticas.

A maioria dos modelos aborda conjuntos de medidas de desempenho. No modelo SCOR<sup>®</sup> as métricas estão agrupadas em cinco atributos: confiabilidade, responsividade, agilidade, custos e gestão de ativos. Cada atributo abrange um conjunto de KPIs que estão estruturados em três níveis de métricas, cuja função é medir a habilidade da CS em executar direções estratégicas (APICS, 2017). O SCOR<sup>®</sup> apresenta 10 métricas estratégicas relacionadas ao nível 1, focadas em mensurar o desempenho global das CSs. Os processos-chave de negócio da abordagem estão ligados ao conjunto de métricas. As métricas de desempenho SCOR<sup>®</sup> usadas nesta tese para CSs foram adaptadas e formatadas para constituir o SMD desta pesquisa.

## 2.2 Operações logísticas em cadeias de suprimentos

Esta seção abrange aspectos da área de logística, particularmente as operações no âmbito de CSs, incluindo as principais decisões que cercam este campo do conhecimento.

### 2.2.1 Importância, evolução e escopo

A formação de CSs é uma estratégia competitiva que as empresas vêm usando para alavancar seus negócios, maximizando suas taxas de rentabilidade. Esta transformação impulsionou o surgimento das redes globais de suprimentos, que têm, por fim, obter vantagem competitiva por meio da formação de parcerias colaborativas nesses arranjos. Ou seja, pela adoção desta estratégia competitiva (PORTER, 1985).

Esper, Fugate e Davis-Sramek (2007) destacam a função estratégica da logística como uma fonte sustentável de vantagem competitiva, contemplando várias capacidades diferenciadoras que podem fortalecer o nível de competitividade das empresas. O termo logística tem sua etimologia do verbo *loger* (alojar), vocábulo bastante empregado nas operações bélicas para movimentar as tropas, armazenar e distribuir os suprimentos (MAGEE, 1977). Os conceitos de logística se transformaram, assumindo um papel mais estratégico em CSs. Considerando as mudanças na área, o CSCMP (2013) definiu a gestão logística como sendo um subgrupo da SCM que planeja, implanta e controla os fluxos de armazenagem, serviços e informações do ponto de origem ao ponto de consumo, em atendimento aos clientes.

A evolução da logística pode ser resumida em cinco fases históricas: fase 1 (até 1940) – abordagem militar, fase 2 (1941 a 1960), fragmentação de atividades; fase 3 (1961 a 1980) – integração logística; fase 4 (1981 a 1990) – inserção do conceito SCM e fase 5 (após 1990) – gestão logística da CS. A fase contemporânea estende as competências logísticas centrais às estruturas das CSs. Assim, a logística é um dos pilares que sustentam o conceito SCM em termos de manutenção dos fluxos atinentes ao seu escopo (materiais/componentes, produtos e informação). Portanto, a gestão logística e suas competências de integração se estendem ao escopo de atuação das CSs, compreendendo também funções logísticas intraorganizacionais, como por exemplo, a logística de produção para sistemas de montagem e manufatura.

## 2.2.2 Áreas da logística

Quanto às operações e perspectiva gerencial, a logística pode ser classificada em áreas que contemplam a maioria de seus macroprocessos, conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4 – Segmentação logística

Segmento	Conceito
Logística de suprimentos	Conhecida como logística <i>inbound</i> relaciona-se com o canal de suprimentos desenvolvido entre a empresa e seus fornecedores com a finalidade de abastecê-la de insumos necessários à viabilização da produção (CHING, 2001).
Logística de produção	Conhecida como logística planta ela foca nas operações logísticas no âmbito da manufatura/montagem e suas relações com outros setores, tais como: recebimento, armazenagem e distribuição interna de insumos (PORTER, 1985).
Logística de distribuição	Conhecida como logística <i>outbound</i> relaciona-se com a distribuição física dos produtos acabados aos pontos de entrega ou consumo incluindo comumente atividades de armazenagem (NOVAES, 2007).
Logística integrada	Tem como principal função vincular e sincronizar toda a CS como um processo contínuo que é essencial para a efetiva conectividade do arranjo (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2012).
Logística reversa	Planejamento, implantação e controle eficiente do fluxo de materiais, estoque em processo, produtos acabados e informações, a um custo adequado, do ponto de consumo ao ponto de origem, com o objetivo de recapturar ou criar valor ou a eliminação apropriada (ROGERS; TIBBEN-LEMBKE, 2001).
Logística empresarial	Conjunto de atividades sistemáticas e coordenadas requeridas para providenciar a movimentação física e armazenagem de produtos das instalações dos fornecedores ao mercado consumidor de forma eficiente [...] (CSCMP, 2013).
Logística integrada à SCM	Subgrupo SCM que planeja, implanta e controla de forma eficiente e efetiva os fluxos diretos e reversos e a armazenagem de bens, serviços e informações relacionadas entre o ponto de origem ao ponto de consumo em atendimento às necessidades dos clientes (CSCMP, 2013).

Fonte: Produção do próprio autor

A visualização da logística em áreas distintas auxilia na delimitação do escopo das funções logísticas nas CSs, facilitando o mapeamento dos processos logísticos entre elos do arranjo e ajudando na modelagem de processos e relações de interdependência entre o sistema logístico e a estrutura da CS. Além dessas áreas, outras podem ser mencionadas: logística humanitária, logística *e-commerce* (comércio eletrônico e empresas virtuais), logística 4.0, e outras.

## 2.2.3 Sistema logístico e processos

Ghiani, Laporte e Musmanno (2004, p. 1) conceituam sistema logístico como “um conjunto de instalações conectadas pelos serviços de transporte”. Indo além deste escopo, um sistema logístico tem como função, ao menos nas CSs imediatas ou diretas, auxiliar na integração e sincronização, dos segmentos suprimentos, produção e distribuição, a partir do conceito de logística integrada.

Sistemas logísticos abrangem recursos, conhecimentos, abordagens de gestão e capacidades básicas para manter as operações nas CSs e, portanto, devem ser responsivos e dinâmicos para absorver e se adaptarem as mudanças no ambiente competitivo das empresas. O conjunto de macroprocessos logísticos é um dos principais pilares do sistema logístico, cujas funções logísticas são guiadas pela gestão horizontal de seus segmentos. O Quadro 5 ilustra conceitos dos processos logísticos.

Quadro 5 – Processos logísticos

P/S	Processos	Conceitos
PRIMÁRIOS (P)	Serviço ao cliente	É o resultado líquido da execução de todas as atividades componentes do <i>mix</i> logístico (BALLOU, 2006).
	Gestão do transporte	Função que promove a movimentação e estocagem de produtos gerando-se economia de escala e distância (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2012).
	Gestão de estoques	É o processo de assegurar a disponibilidade de produtos por meio da gestão da administração dos fluxos de estoques (CSCMP, 2013).
	Processamento de pedidos	Abrange atividades do ciclo de pedido como preparação, transmissão, recebimento, expedição e relatórios sobre o pedido (BALLOU, 2006).
	Previsão da demanda	Projeções das quantidades e itens que provavelmente serão produzidos, vendidos e expedidos (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2012).
SECUNDÁRIOS (S)	Embalagem	Atividade que tem como função fornecer proteção ao produto durante a movimentação e armazenagem (LAMBERT; STOCK; ELLRAM, 1998).
	Manuseio e movimentação	Manuseio e movimentação física de materiais e produtos entre os setores de compras, produção e expedição (CSCMP, 2013). Conceito adaptado.
	Armazenagem/estocagem	Armazenagem e retenção de produtos para consumo ou uso posterior gerando valor em tempo e lugar (LAMBERT; STOCK; ELLRAM, 1998).
	Gestão de instalações	Projeto de instalações para acomodar os fluxos físicos entre pontos de fornecimento e demanda (GHIANI; LAPORTE; MUSMANNO, 2004).
	Logística reversa	Serviços pós-venda, reaproveitamento e remoção de refugos, retornos de materiais e produtos (LAMBERT; STOCK; ELLRAM, 1998).
	Terceirização logística	Fornecimento integrado de serviços logísticos para atender as necessidades logísticas de clientes (FLEURY; WANKE; FIGUEIREDO, 2000).
	Compras/suprimentos	Aquisição de materiais e serviços de fornecedores e sua distribuição para apoiar as operações da empresa (LAMBERT; STOCK; ELLRAM, 1998).
	Gestão de sistemas de informação logística	Rastrear, compartilhar e integrar sistemas de informação para apoio à decisão e suporte ao cliente (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2012).

Fonte: Produção do próprio autor

Portanto, os processos logísticos mencionados no Quadro 5 foram utilizados para classificar os processos sob o escopo da função logística na CS.

#### 2.2.4 Decisões logísticas

As decisões mais importantes que permeiam o sistema logístico se formam sobre os processos logísticos. O Quadro 6, criado a partir das contribuições de Ballou (2006), Blanchard (2010), Chopra e Meindl (2007), Riopel, Langevin e Campbell (2005) e Walters (2012), segmentam algumas relevantes decisões logísticas, complementando a discussão realizada na seção 2.2.3.

Quadro 6 – Decisões logísticas

P/S	Processos	Principais decisões
PRIMÁRIOS (P)	Serviço ao cliente	Definição das necessidades e desejos dos clientes, determinação da reação dos clientes ao serviço, estabelecimento dos níveis de serviços.
	Gestão do transporte	Seleção do modal e serviços de transporte, consolidação de fretes, seleção de equipamentos, definição de rotas, programação de veículos, auditoria de fretes e processamento de reclamações.
	Gestão de estoques	Políticas de estocagem de matérias-primas e produtos acabados, definição do <i>mix</i> de produtos nos pontos de estocagem, determinação do número, tamanho e localização dos pontos de estocagem, definição de estoques de segurança, implantação de estratégias JIT, de empurrar ou puxar o fluxo.
	Processamento de pedidos	Estabelecimentos dos procedimentos de interface entre pedidos de compra e estoques, elaboração e implantação de métodos de transmissão das informações sobre pedidos, definição de regras sobre pedidos.
	Previsão da demanda	Modelagem dos dados sobre os produtos/insumos, definição dos métodos de previsão, acompanhamento da realização das projeções (erros).
SECUNDÁRIOS (S)	Embalagem	Definição das formas de manuseio, determinação das modalidades de estocagem, definição das necessidades de embalagem, tipos e projeto das embalagens contra as perdas e danos, informações sobre o produto.
	Manuseio e movimentação	Seleção do equipamento, normas de substituição do equipamento, rotinas para separação de pedidos, alocação e recuperação de materiais.
	Armazenagem/estocagem	Definição do espaço, <i>layout</i> do estoque e projeto de docas, configuração do armazém, localização do estoque, sistema de segurança e rastreamento.
	Gestão de instalações	Projeto da estratégia, determinação dos fatores críticos e influenciadores, definição das opções de localização, decisão sobre os modelos de seleção, escolha da instalação (local).
	Logística reversa	Definição do <i>mix</i> de produtos ou materiais retornáveis, seleção dos canais reversos (pós-consumo e pós-venda), seleção dos pontos de origem ou de destinação final, transporte, armazenagem e distribuição.
	Terceirização logística	Análise da cadeia de valor, seleção dos processos terceirizados, seleção e definição dos provedores, mecanismos de relacionamentos e parcerias, desempenho dos PSLs, instrumentos de quebra de vínculo.
	Compras/suprimentos	Tipos de compras, seleção das fontes de suprimentos, especificações das compras, definição dos pontos de pedido, determinação dos intervalos e quantidades de itens a serem adquiridos.
	Sistemas de informação logística (SILs)	Coleta, armazenagem e manipulação da informação, análise de dados, procedimentos de controle, estabelecimento e implantação de abordagens baseadas em TI, definição de recursos, sistemas integrados de gestão.

Fonte: Produção do próprio autor

As decisões logísticas devem ser analisadas em três níveis: estratégico, tático e operacional. As decisões estratégicas estão mais conexas aos processos logísticos de serviço ao cliente, terceirização e gestão dos SILs. As decisões táticas compreendem a gestão das instalações e previsão da demanda. As demais decisões compreendem o nível operacional.

## 2.3 Riscos em cadeias de suprimentos

Esta seção apresenta alguns conceitos introdutórios sobre riscos em CSs, contextualizando-os ao ambiente destes arranjos.

### 2.3.1 Risco, incerteza e vulnerabilidade

Algumas tragédias no mundo provocaram relevantes impactos e por vezes afetaram CSs, já que os fluxos são rompidos, causando danos na relação suprimento/demanda, os chamados riscos de ruptura (TANG, 2006a). Segundo Sodhi e Tang (2012) e Kogan e Tapiero (2007), os riscos são efeitos decorrentes e as probabilidades em torno dessas implicações (HARLAND; BRENCHLEY; WALKER, 2003; JÜTTNER; PECK; CHRISTOPHER, 2003; SCHLEGEL; TRENT, 2015), provocando ruptura de fluxos na CS (JÜTTNER, 2005; LI; CHEN; WANG, 2011; WAGNER; BODE, 2008), perda financeira (ZSIDISIN; ELLRAM, 2003), e outros danos.

Mitchell (1991) definiu o risco como “a probabilidade de perda e a significância dessa perda para a organização ou indivíduo”. A Equação 1 indica a formulação para estimar o risco que relaciona a probabilidade da perda ( $P_n$ ) e a significância ( $L_n$ ) para um evento.

$$Risco_n = P (\text{Probabilidade de perda}_n) \times L (\text{Perda}_n) \quad (1)$$

**Sendo:**  $n$  é o tipo de perda ou risco.

A maioria das definições em riscos inclui: (a) a probabilidade de ocorrência de um particular evento ou ação; b) as consequências de um particular evento ou ação ocorrer e; c) a exposição ou caminho causal que leva a ocorrência do evento (RITCHIE; BRINDLEY, 2007). Assim, o risco relaciona a chance de ocorrência de um evento e seus respectivos impactos, podendo provocar perdas aos membros da CS (HARLAND; BRENCHLEY; WALKER, 2003).

Uma importante distinção é entre riscos e incerteza. Walters (2007) conceitua incerteza como uma lista de eventos que podem ocorrer no futuro. Todavia, não se tem precisão sobre o que realmente ocorrerá ou suas probabilidades relativas. No risco, os eventos podem ocorrer no futuro e suas probabilidades medidas. A diferença chave entre os termos é que os riscos são quantificados para eventos futuros, enquanto a incerteza não. Walters (2007) classifica esses termos em diferentes níveis: ignorância, incerteza, risco e certeza. A vulnerabilidade em CSs (SVENSSON, 2000; 2002) está associada à susceptibilidade ou exposição a um evento de ruptura na cadeia (BLACKHURST et al., 2018). Para Jüttner (2005, p. 124) “é uma exposição a sérios distúrbios crescendo a partir de riscos em CSs e afetando a habilidade da CS em servir efetivamente o mercado do consumidor final”.

Peck (2005) focou suas pesquisas em fontes (*drivers*) de vulnerabilidades em CSs, avançando na explicação do escopo e natureza dinâmica dos riscos pela compreensão das motivações que tornam esses arranjos mais frágeis.

### **2.3.2 Evento, fonte e consequências dos riscos**

Schlegel e Trent (2015) conceituam evento de risco como um risco que venha a se tornar real, materializando sua ocorrência, e, por conseguinte, os efeitos correlatos. O risco se torna real a partir da ocorrência de um evento. Sodhi e Tang (2012) aplicaram um modelo para posicionar causas, efeitos e eventos do risco. A ocorrência do evento de risco é o ponto de acoplamento das causas e consequências provocadas pelo risco. As causas ocorrem antes do gatilho do evento do risco e os impactos são sentidos após a ocorrência do evento.

A representação do modelo de Sodhi e Tang (2012), similar à Figura 4, ajuda a descrever os riscos em CSs, separando as causas dos eventos de riscos de suas consequências. Os autores defendem que os esforços de gestão são orientados para prevenção das causas e nas respostas aos impactos dos riscos. Conforme Ritchie e Brindley (2007) os *drivers* sinalizam aquelas fontes de riscos que tem maiores impactos sobre o desempenho da CS e abrangem todos os membros, funcionando como filtros para as principais causas.

*Drivers* podem se apresentar em classes como: ambiental, industrial e organizacional (RAO; GOLDSBY, 2009); ambiental, demanda, suprimento, processo e controle (MASON-JONES; TOWILL, 1998); CS informacional, financeira, física, relacional e inovadora (CAVINATO, 2004), e outras. Para Ritchie e Brindley (2007) as fontes de riscos representam duas amplas categorias quanto à exposição: riscos sistemáticos, que são aqueles inevitáveis, como tremores de terra, e não sistemáticos, que são evitáveis, tais como, falhas na entrega de produtos.

Consequências, efeitos, perdas e impactos são considerados como termos similares. Boa parte dos trabalhos científicos e aplicações se baseiam em atenuar os efeitos dos impactos dos riscos nas CSs. Os impactos podem ocorrer em diversos níveis (graus) e envolver múltiplas e transversais fontes de riscos. Assim, a natureza do impacto é diversa quando o evento do risco é materializado na forma de seus respectivos riscos.

Sodhi e Tang (2012) comentam os desafios associados ao rastreamento, à medição e avaliação de impactos pela multidimensionalidade dos efeitos, tais como: consequências que não podem ser mapeadas por uma única métrica financeira, perdas financeiras de curto prazo (redução da receita) e de longo prazo (queda nos preços), desgastes no valor da marca ou perdas de vidas humanas, como por exemplo, o acidente com o time da Chapecoense. Impactos financeiros e econômicos são mais usados para avaliar a criticidade e os efeitos dos riscos.

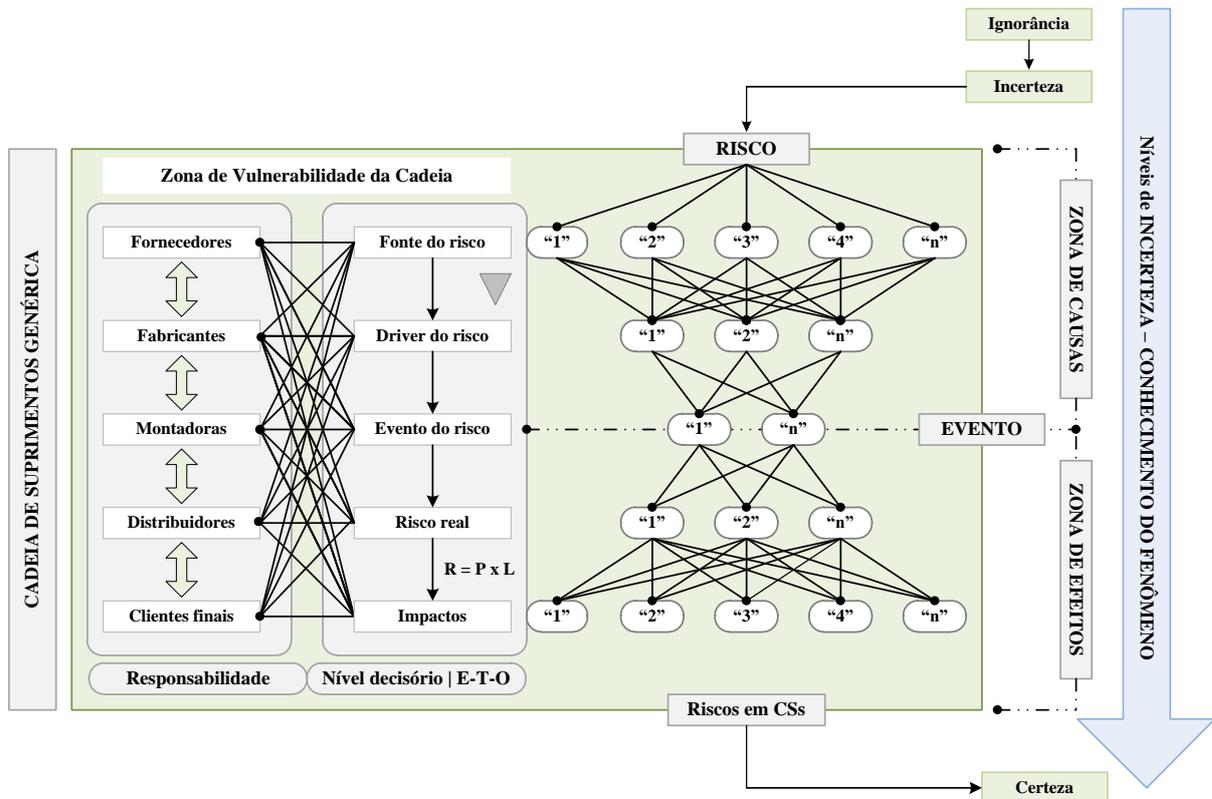
### **2.3.3 Responsabilidade, nível decisório e atitude ao risco**

A partir da revisão sistemática de literatura sobre riscos em CSs evidenciou uma escassez de trabalhos explorando aspectos como a responsabilidade e nível decisório em uma mesma base conceitual. A pesquisa elaborada por Aloini et al. (2012) exemplifica a carência de estudos sobre os temas. Eles elaboraram um *framework* metodológico envolvendo o nível decisório, (estratégicos, táticos e operacionais) pelos quais fatores de risco manifestam seus efeitos, com as medidas apropriadas de contenção e suas ações de implantação e; responsabilidade, que é a designação de autoridade dos membros da CS no processo de tomada de decisão sobre a medição, controle e a gestão dos fatores de riscos.

A atitude ou preferência ao risco (VON NEUMANN; MORGENSTERN, 1953), de acordo com Heckmann, Comes e Nickel (2015, p. 127), “[...] tem influência decisiva sobre medição do desempenho futuro da CS e conseqüentemente co-determina as decisões em CSs”. Existem três perfis de atitudes ao risco para o tomador de decisão na CS: indivíduo avesso ao risco (*Risk-averser*); pessoa propensa a assumir um risco (*Risk-seeker*) e decisor neutro ao risco (*Risk-neutral*).

Decisores ou membros de arranjos avessos ao risco aceitam uma perda mínima em torno dos seus valores alvo em relação aos objetivos da CS. O perfil de propenso ao risco absorve níveis elevados de perdas em troca de outro objetivo, desde que haja benefícios. No terceiro grupo os gestores neutros ao risco em relação aos dois primeiros grupos (HECKMANN; COMES; NICKEL, 2015). Em síntese, análogos à área financeira, os perfis são, respectivamente, conservador, agressivo e moderado. Baseado em Walters (2007) e Sodhi e Tang (2012), um *framework* (Figura 4) foi desenvolvido para sintetizar os conceitos vistos nesta subseção e modelar o perfil do risco em CSs.

Figura 4 – Estrutura conceitual do perfil do risco



Fonte: Adaptado de Walters (2007) e Sodhi e Tang (2012)

Os níveis de incerteza (WALTERS, 2007) foram dispostos em quatro categorias: ignorância, incerteza, risco e certeza. À medida que se conhece mais o fenômeno ou evento em termos probabilísticos, o nível de incerteza diminui proporcionalmente. Múltiplas fontes de riscos podem concorrer para que um evento (ou vários) se realize.

O número de fontes de riscos é minimizado a partir do *driver*, o qual atua como um filtro para selecionar as causas que podem impactar mais no desempenho da CSs. Os eventos de riscos podem ou não se materializar. Caso esses ocorram, o risco passa a não mais ser um potencial de risco. Entretanto, um risco real que se materializou pela incidência do evento. Assim, os riscos provocam múltiplos impactos, cuja relação é dimensionada pela probabilidade de ocorrência do Risco ( $P_n$ ) versus a perda ou impacto ( $L_n$ ) associado.

Na Figura 4, a linha tracejada no retângulo evento do risco ilustra o momento em que o risco é disparado. Prováveis causas ocorrem e mudam de status para impactos. É o ponto pelos quais os impactos se realizam.

O modelo de Sodhi e Tang (2012) descreve as relações de riscos entre as causas (zona de causas), o evento e os impactos (zona de efeitos). As ligações múltiplas cruzadas entre caixas mostram as potenciais relações multilaterais simultâneas e de interdependência entre fontes, *drivers*, eventos, riscos e seus impactos. De acordo com a configuração básica de uma CS genérica, essas relações podem atingir o arranjo e seus membros. Segundo Sodhi e Tang (2012) os *drivers* e impactos podem ser locais (empresas individuais) ou globais (CSs). As setas bidirecionais indicam os fluxos de materiais/produtos e informação.

Os conceitos de responsabilidade pela gestão do risco e de nível decisório, classificados em E-estratégico, T – Tático e O – Operacional, são intrínsecos e devem ser considerados de forma simultânea para fins de tratamento dos riscos. A responsabilidade é imputada a cada membro da CS. Assim, a atitude ao risco (aversão, absorção e neutralidade) pode ser configurada no momento em que se atribui a responsabilidade aos integrantes da CS. O nível decisório nas dimensões fontes, *drivers*, evento, riscos, impactos estão relacionados aos perfis dos gestores, justificando a interdependência com os conceitos de responsabilidade e atitudes ao risco. A zona de vulnerabilidade é uma área abstrata que demarca a susceptibilidade da CS aos efeitos dos riscos, podendo se estender à zona de incerteza. Todavia, o recorte é dado à zona de risco devido ao conhecimento das probabilidades relacionadas à ocorrência do risco.

## **2.4 Gestão de riscos em cadeias de suprimentos**

Esta seção aborda os fundamentos da gestão aplicada ao tratamento do risco, relacionando as justificativas para lidar com riscos, conceitos de GRCSs, objetivos, benefícios e princípios, as principais abordagens e as fases ou processos da GRCSs.

### **2.4.1 Razões para gerenciar os riscos**

A perda de 400 milhões de dólares gerada por um incêndio nas instalações de um fornecedor da Ericsson nos Estados Unidos levou a empresa a desenvolver uma abordagem proativa e estratégica de gestão de riscos (NORRMAN; JANSOON, 2004). O crescimento e incidência de fatores de riscos ressaltam a importância da GRCSs para as organizações, como atestam pesquisas realizadas com grandes CSs (JÜTTNER, 2005). Tais evidências têm influenciado CSs, como Hewlett Packard, SYSCO, Wal-Mart, Procter & Gamble a constituírem grupos de trabalho para mitigar riscos que permeiam seus ambientes (SODHI; SON; TANG, 2012).

Para Narasimha e Talluri (2009) vários motivos e tendências industriais justificam o interesse das empresas na GRCSs, por exemplo, terceirização estratégica, dependência de fornecedores para recursos especializados e inovação, dependência das redes de suprimentos, globalização de mercados, necessidade de obtenção de vantagem competitiva e emergência de tecnologias de informação que permitem controlar e coordenar CSs estendidas. O tratamento dos riscos deve ser apoiado por abordagens de GRCSs. Os desenvolvimentos evidenciados demonstram que a maturação conceitual e metodológica da área encontra-se em fase infante (JÜTTNER, 2005; SODHI; SON; TANG, 2012), carecendo de novas pesquisas.

#### **2.4.2 Conceitos sobre gestão de riscos em cadeias de suprimentos**

É importante distinguir termos correlatos à gestão de riscos empresariais. Curkovic, Scannel e Wagner (2016) comentam que a gestão de risco empresarial (*Enterprise Risk Management*) – ERM – providencia a estrutura e um conjunto de ferramentas para gerenciar riscos. Os autores abordam que a GRCSs, sendo um dos elementos ERM, emerge como uma viável, proativa e estratégia SCM. Conforme o Aberdeen Group (2008) ERM é o processo para identificação, avaliação e gestão efetiva de todos os riscos relevantes para uma entidade.

Para Walters (2007) as diferenças se explicam pela abrangência da unidade que afeta ou é afetada pelos riscos: empresas individuais ou CSs. O *Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission* define ERM (COSO, 2004) como um processo de definição de estratégias empresariais criado para identificar e gerenciar eventos potenciais que podem afetar a organização concorrendo para a garantia do alcance e seus objetivos. Kleindorfer e Saad (2005) afirmam que historicamente a gestão de riscos operacionais e de ruptura tem sido implantada sob as bases da ERM.

Sodhi, Son e Tang (2012) exploraram três *gaps* conceituais sobre GRCSs, constatando que esta emergente área está evoluindo. Contudo, destacam a percepção difusa sobre a abordagem desta área a partir de diferentes domínios. Não há claro consenso, pois alguns pesquisadores limitam o escopo à ocorrência de raros eventos, porém impactantes, enquanto outros associam às incertezas na relação suprimento e demanda. Sobre o processo GRCSs os relatos apontam para a ausência de pesquisas sobre respostas aos incidentes provocados pelos riscos em CSs e desenvolvimentos empíricos relacionados às metodologias sobre GRCSs. O Quadro 7 pode esclarecer diferenças entre os termos ERM e GRCSs.

Quadro 7 – Definições sobre gestão de riscos em cadeias de suprimentos

Autoria	Definições
Faisal, Banwet e Shankar (2007)	É o processo de mitigação do risco através da colaboração, coordenação e aplicação das ferramentas da gestão de riscos entre os parceiros, para assegurar continuidade acoplada com a rentabilidade de longo prazo da CSs.
Jüttner, Peck e Christopher (2003)	É o processo de identificar e gerenciar os riscos em CSs através de uma abordagem coordenada entre os membros da CSs para reduzir a vulnerabilidade da CS como um todo.
Manuj e Mentzer (2008a)	É a identificação e estimação de riscos e perdas consequentes na cadeia global de suprimentos e implantação de estratégias apropriadas através da abordagem coordenada entre membros da CS com o objetivo de reduzir um ou mais dos elementos - perdas, probabilidade, velocidade do evento, velocidade da perda, tempo de detecção dos eventos, frequência ou exposição – para que os resultados da CS se aproximem de economias reais de custos e rentabilidade com o que foi desejado.
Neiger, Rotaru e Churilov (2009)	Representa o desenvolvimento de abordagens para identificar, avaliar, analisar e tratar áreas de vulnerabilidade e riscos em CSs.
Norrman e Lindroth (2002)	É a colaboração com parceiros na aplicação de ferramentas para tratar com os riscos e incertezas provocados, ou impactando nas atividades ou recursos logísticos.
Tang (2006a)	É a gestão de riscos em CSs através da coordenação e colaboração entre os membros da CSs para assegurar a rentabilidade e continuidade.
Walters (2007)	É o processo de sistematicamente identificar, analisar e tratar os riscos em CSs, sendo responsável por todos os aspectos de riscos na CSs.
Wieland e Wallenburg (2012)	É a implantação de estratégias para gerenciar todos os dias riscos excepcionais ao longo da CS através da avaliação contínua do risco com objetivo de reduzir a vulnerabilidade e assegurar a continuidade.

Fonte: Produção do próprio autor

O termo GRCSs surge no artigo de Jüttner, Peck e Christopher (2003) intitulado por “*Supply Chain Risk Management: Outlining an agenda for future research*”, publicado pela revista *International Journal of Logistics: Research and Applications*. Em 2004 dois trabalhos foram observados: “*Supply Chain Risk Management (FINCH, 2004)*” e “*Ericsson's proactive Supply Chain Risk Management approach after a serious sub-supplier accident*”, obra escrita por Norrman e Jansson (2004), ambos publicados em logística e SCM com o termo SCRM.

Os conceitos GRCSs se alinham em bases de gestão para minimizar ou eliminar impactos que podem afetar o desempenho global das CSs, envolvendo ações relacionadas à identificação, avaliação e mitigação dos eventos que provocam os riscos e disparam efeitos correlatos. Com base nas alegações de Sodhi, Son e Tang (2012) sobre a necessidade de maturação da GRCSs, nenhuma definição foi escolhida. Entretanto, é conveniente expandir ao contexto das CSs que a GRCSs permeia a utilização sistemática de processos para a implantação da gestão; adoção de relações coordenativas e colaborativas entre *players* do arranjo para a implantação de uma abordagem e foco na redução das vulnerabilidades e efeitos provocados pelos riscos.

### 2.4.3 Objetivos, benefícios e princípios da gestão de riscos

Segundo Walters (2007) o objetivo da GRCSs é assegurar que CSs trabalhem como planejado com fluxos de materiais suaves e ininterruptos, dos fornecedores aos clientes finais. O Quadro 8, adaptado do mesmo autor, ilustra objetivos específicos da gestão de riscos.

Quadro 8 – Objetivos da gestão de riscos em cadeias de suprimentos

Aspecto	Significado do objetivo
Projeto da estratégia de risco	Deve-se projetar uma estratégia de risco para a CS alinhada às mais altas estratégias organizacionais e configurar o contexto para a GRCSs.
Atendimento de requisitos	Atender a requisitos legais, regulatórios, contratuais e da sociedade para a gestão de riscos.
Função SCM	Incorporar a gestão de riscos à função e princípios SCM.
Estrutura	Assegurar recursos, sistemas, estrutura física e infraestrutura apropriada para a GRCSs.
Melhores práticas	Identificar as melhores práticas de GRCSs com procedimentos relevantes, tecnologia, informação e planejamento.
Uso das práticas de sucesso	Utilizar das melhores práticas para identificar, analisar e planejar as respostas aos riscos que são relevantes para a SCM.
Implantação das respostas	Implantar as respostas planejadas aos riscos quando necessárias e controlar as ações subsequentes.
Monitoramento do desempenho	Monitorar o desempenho e continuamente desenvolver e melhorar os métodos usados na gestão dos riscos.
Cooperação	Cooperar com outras partes da organização e membros da CS para fornecer uma coerente atitude ao risco.

Fonte: Produção do próprio autor

O cumprimento do objetivo global da GRCSs pode promover significativos ganhos em termos de valor e benefícios gerados, desde que a CS assuma a abordagem que foi implantada como uma filosofia gerencial responsável por contribuir para execução das estratégias competitivas da CS e de seus membros. Dispor de mecanismos de gestão que garantam sustentabilidade no desempenho destas complexas redes e explorar a GRCSs e seus benefícios podem contribuir para a obtenção de vantagem competitiva dos players como ilustra o Quadro 9 (WALTERS, 2007).

Quadro 9 – Benefícios gerados pela gestão de riscos em cadeias de suprimentos

Aspecto	Significado do objetivo
Antecipação	Questões sobre risco são consideradas em avanço como parte normal das práticas de gestão.
Decisões balanceadas	Decisões balanceadas são possíveis, incluindo tópicos sobre riscos. Isto pode ser possível com o auxílio dos métodos de otimização.
Operações arriscadas	Operações arriscadas ou com alto impacto financeiro podem ser evitadas.
Responsabilidade	A responsabilidade pelo risco é atribuída à pessoa, setor mais apropriado.
Desempenho da gestão	O desempenho da gestão pode ser medido, distinguindo-se entre boa sorte e boa gestão.
Identificação antecipada	Riscos são identificados antes dos eventos ocorrerem e gerar as crises.
Avaliação precoce	A avaliação precoce de riscos permite melhor planejamento, priorização e alocação dos recursos.
Respostas alternativas	Respostas alternativas aos riscos podem ser projetadas, estimadas, comparadas e planejadas. A simulação pode contribuir neste sentido.
Respostas criativas	Respostas criativas podem ser desenvolvidas quando há tempo suficiente e não necessidade urgente de responder aos eventos reais.
Planos de contingência	Planos de contingência podem ser implantados rapidamente quando os eventos de risco se materializam na prática.
Menos rupturas	Operações têm menos rupturas e volatilidade, melhorando o desempenho financeiro, serviço ao consumidor, imagem da empresa, entre outros.
Monitoramento	Operações são constantemente monitoradas para identificar problemas emergentes.
Perfil histórico do risco	O perfil do risco pode ser construído em um registro que melhora as respostas a riscos futuros.
Comunicações melhoradas	A melhoria na comunicação provém envolvimento comum e compreensão.
Habilidades analíticas	As habilidades comuns das pessoas são desenvolvidas e elas são permitidas a dar atenção aos mais importantes aspectos na gestão dos riscos.

Fonte: Adaptado de Walters (2007)

A gestão proativa de riscos, eficiente e focada em resultados deve ser norteadada por princípios que regem a implantação e manutenção da abordagem. Walters (2007) menciona princípios, como redução do risco pela diversificação (tais como: ter múltiplas fontes de fornecimento, instalações, transportes em paralelo); redução do risco pela agilidade (tais como: produtos e transportes, modularizar componentes e processos); proatividade da GRCSs (intervir para identificar, analisar e responder ao risco); práticas de melhoria contínua, tais como: PDCA (Planejar – Executar – Verificar – Atuar) ou DMAIC (Definir – Medir – Analisar – Melhorar – Controlar).

O trabalho mais citado na literatura sobre riscos em CSs é de Kleindorfer e Saad (2005), cujos autores sugerem dez princípios que podem ser adotados para orientar a gestão de riscos no âmbito das CSs, como mostra o Quadro 10.

Quadro 10 – Princípios da gestão de riscos em cadeias de suprimentos

Princípio	Significado
Primeiro arrume a casa	Colocar a sua casa em ordem (empresa) antes de esperar ou requerer que outros na CS estendida o façam.
Use a teoria do Portfólio	Fazer uso extensivo da teoria do portfólio uma vez que a diversificação reduz o risco (e.g. localização de instalações, opções de suprimentos, logística).
Robustez no elo fraco	A robustez aos riscos de ruptura em uma CS é determinada pelo elo mais fraco, especialmente por agentes mal intencionados em interromper as operações.
Prevenção é melhor que cura	A prevenção e preempção são melhores alternativas do que mitigar as perdas após a ocorrência dos fatos.
Sistemas <i>Lean</i> e eficiência	Sistemas enxutos e eficiência extrema podem provocar um aumento no nível de vulnerabilidade, tanto individualmente como em toda CS.
Redundância de recursos	<i>Backups</i> nos sistemas, planos de contingência e manutenção de razoável folga podem aumentar o nível de prontidão na gestão dos riscos.
Compartilhamento colaborativo	O compartilhamento colaborativo da informação e melhores práticas entre os membros da CS são cruciais para identificar vulnerabilidades e se preparar para a execução eficaz da gestão de crises.
Avaliação e mensuração	Uma boa gestão de crises não é suficiente. Vincular a avaliação e medição do risco com as opções de gestão dos riscos é fundamental para compreender o potencial dos danos à organização a partir das rupturas estimando e implantando uma mitigação adequada.
Modularização	Modularizar processos e projeto de produtos e outros elementos chave de agilidade e flexibilidade em projetos de CSs <i>lean</i> também fornece alavancagem para a redução de riscos, especialmente para interrupções envolvendo descontinuidade na disponibilidade de matérias-primas e componentes.
Princípios TQM	Adoção de abordagens TQM (Gestão da Qualidade Total), tais como: Six Sigma, provém alavancagem na obtenção de altos níveis de segurança e redução dos riscos de ruptura e minimização dos custos operacionais.

Fonte: Adaptado de Kleindorfer e Saad (2005)

Os relevantes *insights* observados em Kleindorfer e Saad (2005) são fundamentos conceituais que podem ser adotados por CSs que desejam implantar abordagens de gestão de riscos e que podem contribuir para lidar com os riscos, alcançando o sucesso nos resultados esperados, diferentemente dos enfoques tradicionais, em especial aqueles apoiados na teoria da ERM. A visão de princípios defendida por Kleindorfer e Saad (2005) foi escolhida para fundamentar as diretrizes de construção da proposta metodológica desta pesquisa.

#### 2.4.4 Modelos focados na gestão de riscos

Jüttner, Peck e Christopher (2003) elaboraram quatro constructos para identificar aspectos críticos relativos à perspectiva gerencial. Os constructos fontes do risco, CS, consequências do risco na CS e estratégias de mitigação do risco em CSs fornecem a ideia de processos para: (1) avaliar as fontes de riscos em CSs, (2) identificar o conceito de risco pela definição das implicações mais graves, (3) rastrear os *drivers* de risco na estratégia da CSs e (4) mitigar os riscos na CS.

O processo sistemático de gestão de riscos influenciou a formatação de abordagens GRCSs. O Quadro 11 enumera abordagens com duas ou mais fases e mostra várias definições em termos de processos de gestão.

Quadro 11 – Modelos de gestão de riscos em cadeias de suprimentos

<b>Modelos</b>	<b>Processo GRCSs – Fases</b>
Aqlan e Lam (2015b)	Identificação, mensuração, avaliação Fuzzy do risco.
Blome e Schoenherr (2011)	Identificação, análise, mitigação e monitoramento.
Brun et al. (2006)	Análise preliminar da cadeia, análise das operações e processos de negócios e KPIs, avaliação da solução APS/SCM, análise de riscos.
Cook (2007)	Identificação das exposições, transferência do risco financeiro, mitigação das perdas potenciais.
COSO (2004)	Ambiente interno, configuração do objetivo, identificação do evento, avaliação do risco, resposta ao risco, atividades de controle, comunicações e informação, monitoramento.
Curkovic, Scannel e Wagner (2016)	Planejamento, identificação, análise, manuseio, monitoramento.
Cucchiella e Gastaldi (2006)	Análise da CS, identificação das fontes de incerteza, exame dos riscos subsequentes, gestão dos riscos, individualização da opção real mais adequada, implantação da estratégia de risco.
ERMET (Norrman e Jansson, 2004)	Abordagem desenvolvida pela Ericsson– Identificação, avaliação, tratamento, monitoramento, plano de contingência, manuseio de incidentes.
Gaudenzi e Borghesi (2006)	Avaliação, relatório e decisão, tratamento e monitoramento.
Ghadge et al. (2013)	Taxonomia dos riscos, tendência do risco, identificação, modelagem, análise de sensibilidade, avaliação, planejamento da estratégia, mitigação.
Hallikas et al. (2004)	Identificação, avaliação, decisão e implantação das ações de gestão, monitoramento.
Harland, Brenchley e Walker (2003)	Mapeamento da rede de suprimentos, identificação e local atual, avaliação, gestão, estratégia colaborativa ao risco na rede, implantação da estratégia.
ISO 31000:2009	Comunicação e consulta, estabelecimento do contexto, identificação, análise, avaliação, tratamento, monitoramento e revisão.
Kleindorfer e Saad (2005)	Especificação das fontes de riscos e vulnerabilidades, avaliação e mitigação.
Kouvelis et al. (2012)	Identificação, avaliação, planejamento da mitigação, escaneamento, resposta e mensuração.
Manuj e Mentzer (2008b)	Identificação, estimação e avaliação, seleção das estratégias adequadas, implantação das estratégias, mitigação.
Mullai (2008)	Análise, estimação, gestão, comunicação, reavaliação.
Oehmen et al. (2009)	Identificação, avaliação e mitigação   modelo estrutural e modelo dinâmico.
Olson (2014)	Identificação, avaliação, prevenção e mitigação.
Pradhan e Routroy (2014)	Configuração estratégica, avaliação, tratamento, monitoramento e revisão.
Ritchie e Brindley (2007)	Perfil e fonte de riscos, <i>drivers</i> de desempenho e riscos, consequências do desempenho e riscos, gestão das respostas ao risco, resultados de desempenho e risco.
Schütler e Henke (2017)	Identificação, análise, avaliação, tratamento e controle como fases focadas no nível de maturidade da indústria 4.0 em CSs.
Sodhi, Son e Tang (2012)	Identificação, avaliação, mitigação, responsividade (resposta) ao risco.
Tah e Carr (2001)	Identificação, avaliação, análise, manuseio, monitoramento.
Tummala e Schoenherr (2011)	Identificação, mensuração, estimação, avaliação, mitigação e planos de contingência, controle e monitoramento.
Wu e Blackhurst (2009)	Identificação, avaliação, decisões e implantação da gestão, monitoramento.

Nota: APS – Sistema avançado de planejamento e programação; ERMET: – Ferramenta de gestão de riscos da Ericsson

Fonte: Produção do próprio autor

Oliveira et al. (2017) publicaram uma revisão sistemática de literatura com a finalidade de verificar a aplicabilidade dos padrões da ISO 31000 como procedimentos sistemáticos para a GRCSs, compreendendo a uniformização de etapas e critérios para a seleção de ferramentas e técnicas de acordo com as necessidades e características das corporações. A maior parte dos modelos e abordagens (Quadro 11) converge nas fases de identificação, avaliação e análise, gestão e monitoramento. Nesta pesquisa, o processo sistemático de gestão abrange as fases de identificação, avaliação, gestão, monitoramento e comunicação. Esses estágios são relevantes, uma vez que eles sustentam o desenvolvimento dos procedimentos propostos focados em RLs no contexto das CSs.

#### **2.4.5 O processo de gestão de riscos em cadeias de suprimentos**

Relações entre GRCSs, métodos de simulação, otimização e SMDs não foram identificadas em trabalhos de revisões de literatura ou mesmo *frameworks* conceituais (e.g. SINGHAL; AGARWAL; MITTAL, 2011), motivando a inclusão desses temas. Sobre as fases GRCSs, a identificação do risco compreende a definição de eventos (MANUJ; MENTZER, 2008a); o rastreamento das fontes e dos *drivers* (CHIU; CHOI, 2013), a classificação de fatores, tipos e categorias (RANGEL; OLIVEIRA; LEITE, 2014), mapeamento da CS e análise de riscos. A maioria dos artigos aborda dois ou mais grupos de riscos focados em dimensões operacionais (NAGURNEY; NAGURNEY; LI, 2015), por exemplo, riscos de ruptura (SHU et al., 2014), riscos ambientais (CHRISTOPHER; PECK, 2004), e outros. Riscos financeiros (CARNEIRO; RIBAS; HAMACHER, 2010) são bem explorados, envolvendo aspectos como preço, custos, lucro e retorno.

Os impactos produzidos pelos riscos estão proximamente conectados aos tipos de riscos e podem ser relacionados (RANGEL; OLIVEIRA; LEITE, 2014) aos aspectos: relacional, financeiro, informacional, desempenho, híbrido e outros efeitos. Os impactos financeiros são avaliados comumente pela relação entre custos e riscos (NOORAIE; PARAST, 2015); lucros e riscos (TSE; TAN, 2012), preços (QU et al., 2014) e receitas (APPLEQUIST; PEKNY; REKLAITIS, 2000). Impactos operacionais se relacionam, por exemplo, ao dimensionamento de estoques (*stockout*) e capacidades, operações logísticas, entre outros. Os impactos sobre o desempenho são avaliados por medidas de riscos e resultados (ELLEUCH; HACHICHA; CHABCHOUD, 2013), enquanto impactos informacionais (PENG; PENG; CHEN, 2014) envolvem, por exemplo, atrasos na transmissão da informação.

Na fase de avaliação do risco três atividades são imprescindíveis e relacionam estimação ou medição, priorização e análise de riscos. O risco é medido a partir de relações que consideram a probabilidade de ocorrência dos riscos e seus correspondentes impactos (WHITE, 1995). Os impactos denotam a severidade do risco, caso ele ocorra.

Os riscos são estimados e analisados conforme a probabilidade e criticidade do efeito sobre a CS e avaliados por modelos fundamentados em dimensões quantitativas e/ou qualitativas que usam, comumente, escalas entre 1-10 pontos. A intensidade do risco resulta da combinação entre probabilidade e impacto, cujo risco é medido por um conjunto de medidas (SODHI; TANG, 2012) e serve para priorizar e ranquear riscos. A análise dos riscos aborda a seleção dos riscos mais críticos que serão tratados na fase de gestão. Medidas de riscos quantificam a intensidade do risco. Várias métricas foram observadas na literatura, conforme Quadro 12.

Quadro 12 – Medidas de riscos em cadeias de suprimentos

Grupo de medidas	Autoria
Value-at-Risk e variações	Carneiro, Ribas e Hamacher (2010); Giarola, Bezo e Shah (2013); Hahn e Kuhn (2012); Lodree Jr e Taskin (2008); Qu et al. (2014); Sahay e Ierapetritou (2015); Sodhi (2005); Xu, Meng e Shen (2013); You, Wassick e Grossmann (2009).
Índices de ranking	Elleuch, Hachincha e Chabchoub (2013); Fazli, Mavi e Vosooghidizaji (2015); Kirilmaz e Erol (2017); Olson e Wu (2011); Paul (2015); Tse e Tan (2012); Tuncel e Alpan (2010); Xia e Chen (2011).
Relações de probabilidade	Cheng e Wang (2015); Huang et al. (2013); Li, Ren e Wang (2016); Marufuzzaman et al. (2014); Shu et al. (2014); Xanthopoulos, Vlachos e Iakovou (2012).
Mean-Risk Analysis	Gaonkar e Viswanadham (2007); Liew e Lee (2012); Manuj, Esper e Stank (2014); Peng, Peng e Chen (2014); Tabrizi e Razmi (2013).
Função risco	Cruz, Nagurney e Wakolbinger (2006); Nagurney, Masoumi e Yu (2012); Nagurney, Nagurney e Li (2015), Nooraie e Parast (2015).
Outras medidas	Applequist, Pekny e Reklaitis (2000); Han, Dong e Sun (2014); Le et al. (2013); Wu et al. (2013).

Fonte: Produção do próprio autor

A medida VaR e suas variantes, como: eDR – *Expected Downside Risk* (GIAROLA; BEZZO; SHAH, 2013), VaDR - *Value-at-Disruption risk* (LODREE JR; TASKIN, 2008), DaR – *Demand-at-Risk* e IaR - *Inventory-at-Risk* (SODHI, 2005), DR – *Downside Risk* (HAHN; KUHN, 2012; YOU; WASSICK; GROSSMANN, 2009) medem a exposição ao risco pela probabilidade de que a perda seja maior que o valor alvo (KOUVELIS et al., 2012; KOGAN; TAPIERO, 2007) ou a pior perda esperada a um dado limite de confiança com probabilidade especificada ao longo de um período de tempo. O indicador CVaR foi criado por Rockafellar e Uryasev (2001) para superar as limitações de VaR, apresentando adequação às propriedades matemáticas, coerência, solução explícita, boas características computacionais entre outras.

A abordagem baseada em índices de *ranking* e seleção é utilizada para classificar e priorizar aspectos relacionados a riscos (ELLEUCH; HACHICHA; CHABCHOUD, 2013; TUNCEL; ALPAN, 2010) a partir de métricas, tais como: Número de Prioridade de Risco ou aquelas formatadas através de métodos multicritérios de apoio à decisão (MCDM), por exemplo, ANP (*Analytic Network Process*), DEMATEL (*Decision making trial and evaluation Laboratory*), e FIS (*Fuzzy Inference Systems*) – MIA, Análise Marginal Incremental.

As relações probabilísticas baseadas no conceito de intensidade do risco (SODHI; TANG, 2012), associam impactos ou consequências (CHENG; WANG, 2015; LI; REN; WANG, 2016) às perdas (HUANG et al., 2013), lucro e rupturas (SHU et al., 2014; WU et al., 2013), falhas e custos (MARUFUZZAMAN et al., 2014). Os modelos baseados em probabilidade e impactos do risco são abordagens clássicas de medição da intensidade do risco.

A abordagem desenvolvida por Markowitz (1952), denominada de *Mean-Risk Analysis* é bastante aplicada na medição do risco e dela derivam métricas como: média-variância/desvio padrão e *Mean-downside-risk* (CHIU; CHOI, 2013). Outras formas podem ser utilizadas para mensurar riscos em CSs: matrizes de riscos (WALTERS, 2007), mapas de risco (KOUVELIS et al, 2012); roda de riscos (HANDFIELD; McCORMACK, 2008), funções matemáticas de risco (CRUZ; NAGURNEY; WAKOLBINGER, 2006), histograma bidimensional suavizado (SODHI; TANG, 2012), *Risk Premium* (APPLEQUIST; PEKNY; REKLAITIS, 2000), *Deposit Rate* (HAN; DONG; SUN, 2014) e outras.

Dimensões financeiras são recorrentes na análise de riscos, por vezes ligadas às medidas de riscos, combinando custos e riscos (LIEW; LEE, 2012), custos esperados em problemas de portfólio (QU et al., 2014), custos globais e variância (GAONKAR; VISWANADHAM, 2007), custos esperados, probabilidade de risco financeiro e variabilidade (YOU; WASSICK; GROSSMANN, 2009), custos de compras/transportes (KIRILMAZ; EROL, 2017), etc.

Análises sobre medidas de desempenho, como taxas de preenchimento de pedidos (LI; REN; WANG, 2016), confiabilidade (ELLEUCH; HACHICHA; CHABCHOUD, 2013); taxas de suprimento e níveis de estoque (PENG; PENG; CHEN, 2014), rupturas da produção (SHU et al., 2014); níveis de estoque e demanda não atendida (SODHI, 2005); duração do *stockout* e % de mercado (WU, BLACHHURST; CHIDAMBARAM, 2006) podem ser utilizadas.

Índices de *ranking* baseados em ferramentas, tais como: matriz estocástica ponderada (XIA; CHEN, 2011), modelo matricial DEMATEL-ANP (FAZLI; MAVI; VOSOOGHIDIZAJI, 2015); Número de Prioridade de Risco e indicadores de desempenho (TUNCEL; ALPAN, 2010), podem ser aplicados para analisar os riscos. Algumas abordagens híbridas relacionam dimensões financeiras a tópicos como: visibilidade, custos e riscos (NOORAIE; PARAST, 2015) e lucro e redes sociais (CRUZ; NAGURNEY; WAKOLBINGER, 2006).

Silva et al. (2017), a partir de uma análise crítica sobre modelos de avaliação de riscos para CSs, apresentaram um modelo teórico que combina diferentes técnicas focadas na estimação e cálculo da probabilidade de riscos. Portanto, várias dimensões foram utilizadas para analisar os riscos, com destaques para dimensões financeiras e índices de *ranking*.

A gestão do risco que trata da tomada de decisão em resposta à gravidade do risco e envolve quatro decisões relevantes: seleção da estratégia genérica, escolha da melhor estratégia de resposta, análise da viabilidade (técnica e financeira) da implantação das respostas e projeto e execução do plano de ação. As estratégias mais genéricas (NORRMAN; JANSSON, 2004) se dividem em: prevenir, evitar, compartilhar/transferir, aceitar ou mitigar o risco.

A estratégia de mitigação tem por fim reduzir a probabilidade de ocorrência e/ou impactos dos riscos, para minimizar os seus efeitos, analisar as consequências e propor soluções. Por exemplo, Marufuzzaman et al. (2014) criaram modelos matemáticos para projetar uma rede multimodal de transporte ponderando a probabilidade dos riscos de ruptura.

Transferir o risco representa o repasse de uma parcela do risco para mitigá-lo (SCHLEGEL; TRENT, 2015) empregando estratégias, tais como: contrato de depósito (HAN; DONG; SUN, 2014) e seguro prêmio (LODREE Jr.; TASKIN, 2008). Evitar o risco é eliminar processos, atividades e aspectos que produzam ou venham a oferecer maiores riscos às empresas. Le et al. (2013) criaram um algoritmo para remover conhecimentos sensíveis no compartilhamento de dados.

Na estratégia de prevenção, determinados mecanismos são desenvolvidos para prevenir a materialização dos riscos em CSs. A estratégia de aceitação do risco envolve assumir riscos, frequentemente aqueles de baixa intensidade e de poucos impactos no desempenho da CSs (SCHLEGEL; TRENT, 2015).

As abordagens de solução ou resposta ao risco são diversas, como demonstram os clássicos trabalhos de MANUJ; MENTZER (2008b), TANG (2006b) e CHOPRA; SODHI (2004). No entanto, outras abordagens foram identificadas na literatura, como:

- otimização de portfólio e projetos de redes de CSs (KIRILMAZ; EROL, 2017);
- configuração de parâmetros/cenários (ELLEUCH; HACHINCHA; CHABCHOUB, 2013);
- gestão de estoques (WU et al., 2013);
- terceirização e parcerias (PAUL, 2015);
- risco e seguro prêmio (APPLEQUIST; PEKNY; REKLAITIS, 2000);
- sistemas de suporte à decisão (GÜLLER et al., 2015);
- transportes (SAHAY; IERAPETRITOU, 2015);
- aumento de visibilidade (NOORAIE; PARAST, 2015);
- contratos de depósito (HAN; DONG; SUN, 2014);
- balanceamento entre medidas de risco (HAHN; KUHN, 2012);
- regras de associação (LE et al., 2013);
- soluções híbridas (MANUJ; ESPER; STANK, 2014), entre outras.

Parte relevante das estratégias de resposta ao risco se baseia no conceito de otimização de portfólio (MARKOWITZ, 1952), já que as cadeias estão estruturadas em rede, permitindo a aplicação da técnica de projeto de redes de CSs (*Supply Chain Network Design*).

A fase do monitoramento e controle objetiva o acompanhamento de fatores de riscos visando a pronta detecção e resposta ao evento (HANDFIELD; MCCORMACK, 2008), monitorar o resultado da implantação dos planos de resposta aos riscos (ADHITYA; SRINIVASAN; KARIMI, 2009) com a finalidade de verificar a eficácia e progresso das ações (PRADHAN; ROUTROY, 2014) e averiguar a aplicação das correções, se houver desvios em torno do desempenho esperado (TUMMALA; SCHOENHERR, 2011).

O monitoramento dos riscos pode ser feito por métricas de desempenho, a maioria focada em impactos sobre os custos, causados, como exemplo, por riscos de transportes. Modalidades como perfis/attitudes ao risco e matrizes de riscos (GIAROLA; BEZZO; SHAH, 2013), efeito chicote sobre demanda não atendida (SODHI, 2005), desempenho sobre a gestão de estoques, taxas de suprimentos e estoque, taxas de reposicionamento, *stockout*, nível de serviço em estoque (TOWILL, 2005) ilustram como o risco pode ser acompanhado.

Índices baseados em preenchimento do pedido (*fill-rate*) ou alocação de pedidos (TUNCEL; ALPAN, 2010), identificação de impactos sobre o risco e relações probabilísticas ilustradas em mapas de risco (GAONKAR; VISWANADHAM, 2007) podem mostrar o comportamento do risco.

O risco pode ser avaliado a partir de escores fornecidos por sistemas de *ranking* baseados em critérios de priorização que podem ser empregados para comparar e analisar desempenhos (CHENG; WANG, 2015). Análises baseadas em tempo podem ser relevantes para monitorar as consequências de risco, como por exemplo, a duração do evento do risco (PENG; PENG; CHEN, 2014). Ritchie e Brindley (2007) mencionam a importância de medidas chave de risco para monitor rupturas em CSs e acompanhar o desempenho de planos de contingência.

A fase de comunicação relaciona-se com a disseminação e integração da informação com o fim de fornecer subsídios úteis aos tomadores de decisão. O processo de comunicação deve suportar todas as etapas GRCSs mencionadas. O fluxo de informação deve alcançar todos os envolvidos no projeto, dentro e fora da organização, horizontalmente, a montante e jusante da CS. As informações relevantes devem ser identificadas e compartilhadas aos responsáveis.

Para Mullai (2008) a comunicação é um processo iterativo que envolve a troca de informação e opiniões entre gestores, suporte, tomadores de decisão e outros. É um processo de melhoria contínua e cíclico, já que novos riscos podem ocorrer. Observa-se a escassez de trabalhos que abordam o tema da comunicação entre as fases de GRCSs.

## **2.5 Riscos logísticos**

Esta seção apresenta conceitos sobre RLs, relacionando a fronteira do conhecimento no tema, com base nos desenvolvimentos literários explorados nesta revisão.

### **2.5.1 Importância dos riscos logísticos**

Além das falhas, RLs são impactos que incidem sobre sistema logístico da CS ou que são por ele provocados. Esta perspectiva se apoia no conceito de gestão logística desenvolvido pelo CSCMP (2013). Lynch (2009) comenta que a logística e suas operações é a mais complexa fonte de risco em CSs devido às inúmeras vulnerabilidades presentes no seu ambiente, como por exemplo, restrições comerciais e alfândegarias, regulações, taxas de câmbio, entre outros.

A gestão de RLs tem forte impacto na condução dos negócios dos PSL's e tem como desafio balancear níveis de serviço e custos logísticos sem afetar o desempenho ao consumidor final na CS. Contribuições sobre metodologias sistemáticas de gestão de RLs parecem ser escassas, limitando-se a aplicações pontuais focadas em análises de risco (HUIZHE; LUHUA, 2009; YAN; YAN; MA, 2009).

### **2.5.2 Estado da arte**

Nos últimos anos houve crescimento substancial na quantidade de publicações. Entretanto, no período entre 1980 e 2000, apenas dois trabalhos foram publicados (BOWERSOX; STANK; DAUGUERTY, 1999; WRIGHT, 1980). As modelagens matemáticas são predominantes no tema (YAN; SUO, 2013). Estudos de casos combinados às modelagens matemáticas foram observados, como Yanik (2015), que projetou uma rede logística reversa para uma empresa Turca. Tsai et al. (2012) usaram o método *Survey* para investigar fatores potenciais de riscos associados às falhas no processo de terceirização logística.

Modelagens baseadas no método da simulação não são frequentes, denotando a importância de melhor explorá-la como uma ferramenta útil à gestão de RLs. Os tipos de CSs pertencem basicamente ao setor de serviços logísticos (logística empresarial) relacionando embarques de contêineres (CHANG; XU; SONG, 2015), logística multimodal (KENGPOL; TUAMMEE, 2015), armazenagem (SHAOYUN, 2012), PSLs, entre outros. Liu et al. (2012) usaram a simulação de sistemas dinâmicos para prever e analisar os custos de terceirização logística, sugerindo políticas para minimizar os custos do risco. Quase trinta segmentos relacionados às CSs foram observados na literatura, 11 desses vinculados às operações logísticas.

Temas relacionados à logística/terceirização/PSLs (OLSON; WU, 2011; LOCKAMY III; MCCORMACK, 2010) foram investigados na literatura, além de outros menos frequentes, como por exemplo, mecanismos de coordenação em atividades logísticas e CSs (CROSON et al., 2014; LIU; HE, 2013), decisões sobre estoques (HSIEH; LU, 2010), projetos de redes logísticas e de CSs (SOLEIMANI; GOVINDAN, 2014; NAGURNEY et al., 2005), logística humanitária (DÍAZ-DELGADO; INIESTRA, 2014), estratégia enxuta focada no lançamento de produtos (BOWERSOX; STANK; DAUGUERTY, 1999), entre outros.

Poucos trabalhos têm dedicado esforço à criação de procedimentos específicos para a gestão de RLs. Ao invés, os desenvolvimentos se focam em conteúdo, como mostram Kull e Closs (2008), cujos autores, exploraram o risco de falhas na função suprimentos em uma CSs de segunda camada. *Frameworks* compreendendo etapas sistematizadas para avaliar RLs foram notados (PRAKASH; SONI; RATHORE, 2015). Poucos trabalhos (KIM et al., 2016; LAM et al., 2015; WRIGHT, 1980) focaram seus estudos em metodologias robustas para responder riscos. Porém, essas são abordagens específicas não generalizadas para o contexto de RLs.

Os processos logísticos mais explorados no contexto dos RLs são transportes (CHUNG; TSE; CHOI, 2015; HAVENGA; SIMPSON, 2014), gestão de estoques (MAHATA; DE, 2016; LAI; DEBO; SYCARA, 2009) e terceirização e PSLs (LIN-JUN; 2012; HUANG; LI, 2009) Processos como manuseio, localização de centros de distribuição, logística reversa têm pouca densidade exploratória, podendo ser mais bem explorados.

### **2.5.3 Gestão de riscos logísticos**

A maioria dos artigos foca na fase de gestão do RL ou maneiras de responder aos efeitos dos riscos. Ben-Tal et al. (2011) criaram uma metodologia apoiada em otimização robusta para criar planos logísticos de mitigação do risco em CSs humanitárias. Tsai e Su (2002) aplicaram uma abordagem combinada envolvendo os processos de identificação e avaliação do risco, usando *checklist* (lista de verificação), *brainstorming* (técnica para geração de ideias) e o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Todavia, Havenga e Simpson (2014) ampliaram a aplicação das fases de gestão de riscos para três etapas: identificação, avaliação e gestão. No entanto, os autores não envolveram as fases de monitoramento e controle. Quanto às técnicas e ferramentas, as modelagens matemáticas foram dominantes seguidas de abordagens pós-otimização, tais como: análise de cenários e análise de sensibilidade.

Sobre os métodos de simulação e otimização, os modelos matemáticos foram desenvolvidos e resolvidos via métodos otimizantes, exigindo aplicações computacionais focadas na produção de soluções, com o objetivo de simular parâmetros, cenários ou impactos, via ferramentas de simulação (NOORAIE; PARAST, 2015; HAFEZALKOTOB; MAKUI; SADJADI, 2011), incluindo simulações numéricas. Métodos estatísticos, como testes de hipóteses e modelos de regressão, são mais utilizados para identificar e avaliar fatores de riscos a partir de *Survey* (FILLA; KLINGEBIEL, 2014), questionário/entrevista (FRANSSON; MOLANDER, 2013).

Os métodos MCDM foram utilizados para identificar e avaliar riscos, a partir de ferramentas, como DEMATEL (GOVINDAN; CHAUDHURI, 2016), Teoria Grey (PRAKASH; SONI; RATHORI, 2015), entre outros.

Na fase de identificação do risco o RL de transporte tem sido bem explorado e relaciona-se, por exemplo, a atrasos ou falhas nas operações de transporte (SATTAYAPRASERT et al., 2008). O risco financeiro é importante no contexto da logística e está vinculado a problemas no fluxo de caixa, custos, receitas, lucro, falências, ações, entre outros. Govindan e Chaudhuri (2016) analisaram inter-relações entre riscos, incluindo o risco financeiro no contexto dos 3PL's.

O risco de rupturas relaciona às quebras de fluxos físicos na atividade de suprimentos. Sawik (2014) aplicou métodos de otimização para balancear custos e nível de serviço sob diferentes tipos de rupturas na CS. Não há consenso na categorização de riscos em operações logísticas, tornando difícil classificar os riscos. Os impactos estão relacionados aos custos (JEONG; HONG; XIE, 2014), desempenho das operações logísticas (SCHELLER-WOLF; TAYUR, 2009) e lucro (GOVINDAN; FATTAHI, 2017; CHEN et al., 2014), cujos efeitos são sentidos na forma de perdas.

Na avaliação do risco, 42 métricas e suas variações foram destacadas: probabilidade versus impactos (RIJGERSBERG et al., 2010), média-variância (LIU; NAGURNEY, 2011), CVaR (AZAD et al., 2014), VaR (LOCKAMY III; MCCORMACK, 2010), desvio-padrão (HUNG; RYU, 2008), probabilidade condicional (YAN; SUO, 2013), indicador Fuzzy (JIANWEI; MINJIE; LIWEI, 2011), função densidade de probabilidade (KULKARNI; MAGAZINE; RATURI, 2005), variância (KIM, 2013), indicadores de *ranking* (KENGPOL; TUAMMEE, 2015), entre outras. A maioria das métricas está ligada à função probabilidade, variância ou desvio-padrão, ponderações, perdas ou impactos.

Os impactos estão comumente associados às dimensões financeiras como custo e lucro. Na análise de riscos, apesar da não aplicação de técnicas de ranqueamento e priorização do risco, algum tipo de mecanismo foi utilizado para ordenar e analisar o risco, por exemplo, através de indicadores de ranqueamento de riscos (TSAI; LIAO; HAN, 2008). Outras ferramentas foram observadas na fase de análise, como: gráficos de Pareto, mapas e matrizes de risco, FMEA (Análise dos efeitos e modos de falhas).

As medições de riscos não são baseadas em SMDs. Lin-Jun (2012), Díaz-Delgado e Iniestra (2014) e Lam et al. (2015) relacionaram medidas de desempenho a indicadores de risco. Já Rijgersberg et al. (2010) associaram entradas, como nível de reposição às saídas (% de *stockout*) em um SMD usando a simulação à eventos discretos (SED). Entretanto, sem aplicar métodos otimizantes.

A mitigação é a estratégia genérica de resposta ao risco mais utilizada na gestão do risco. Os métodos de otimização têm um papel relevante na minimização de riscos, sendo amplamente empregados como mecanismo de mitigação. Dois mecanismos de contratos ou acordos foram explorados por Xia, Ramachandran e Gurnani (2011), como estratégia de compartilhamento dos riscos entre suprimento e demanda. Algumas estratégias combinadas foram identificadas com o objetivo de testar as melhores respostas (LIU; WANG, 2015).

As abordagens de soluções são diversas, destaques para projetos de redes em CSs, transporte, instalações e centros de distribuição (MARUFUZZAMAN et al., 2014); políticas de preço, tamanho dos lotes e gestão de estoques (CROSON et al., 2014; PENG; PENG; CHEN, 2014; YANG; XIAO; SHEN, 2009); contratos ou acordos (CHEN et al., 2014) e desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão (SCHATTER; WIENS; SCHULTMAN, 2015) como forma de mitigar riscos. A implantação da estratégia de resposta ao RL em CSs e o controle não estão bem resolvidos na literatura quanto ao aspecto responsabilização e nível decisório (JEREB; IVANUSA; ROSE, 2013), evidenciando necessidades de pesquisas mais aprofundadas no tema. Um grande desafio para as empresas de logística em CSs é projetar o portfólio ótimo de estratégias de mitigação que melhore a relação custo/benefício (lucro) e nível de serviço.

A fase de monitoramento e controle do risco não é bem explorada pelos artigos. Todavia, as análises de risco focadas em resultados se deram predominantemente em termos de custos, lucro e métricas ou funções de risco. As análises são baseadas comumente no comportamento financeiro do impacto, sobretudo custos. Um total de 57 tipos de resultados para análises de riscos foram identificados, a maior parte representada por gráficos bidimensionais. Poucos artigos exploraram o monitoramento do risco, alguns relacionando análise de contextos (KIM et al., 2016), sistemas de suporte à decisão (SCHÄTTER; WIENS; SCHULTMANN, 2015), gestão do conhecimento e identificação por rádio frequência (LAM et al., 2015), sistema de controle baseado em alerta precoce (XIE et al., 2009), e outros.

Sobre a atividade de controle, Li-jun (2012) criaram um modelo para riscos de terceirização logística. No entanto, este tema foi pouco explorado. Necessidades de pesquisas envolvendo a fase de comunicação para RLs foram evidenciadas. Um eficiente processo de comunicação pode melhorar o processo decisório e evitar riscos provenientes de um inadequado tratamento das informações e de processos falhos de comunicação. A partir das discussões realizadas nesta seção, o Quadro 13 ilustra evidências que reforçam os *gaps* encontrados na subseção 1.3.1.

Quadro 13 – *Gaps* e destaques sobre riscos logísticos

<b>Processo de gestão</b>	<b><i>Gaps</i> e destaques</b>
Abordagem metodológica geral	Falta de uma abordagem metodológica e sistêmica para gerenciar riscos logísticos e um guia de implantação.
Identificação do risco	Ausência de uma proposta sistêmica e abrangente para classificar fatores de riscos logísticos.
Avaliação do risco	Escassez de medidas mais robustas focadas para o ambiente dos sistemas logísticos e suas operações no contexto de CSs.
Gestão do risco	Falta de uma proposta para classificar e sugerir abordagens de soluções específicas para RLs, já que a maioria das estratégias de respostas é focada em CSs.
Monitoramento e controle	Necessidade de um sistema de medição de desempenho logístico que forneça dados e informações ( <i>inputs</i>   <i>outputs</i> ) sobre a implantação das estratégias de soluções.
Comunicação	Não há pesquisas sobre aspectos relacionados ao processo de comunicação ou temas correlatos visando aperfeiçoar a integração desta fase às demais.

Fonte: Produção do próprio autor

## 2.6 Simulação, otimização e metamodelagem

Esta seção apresenta discussões sobre métodos de simulação, otimização e meta-modelagem, ilustrando conceitos básicos e principais achados sobre esses temas.

### 2.6.1 Caracterização dos modelos quantitativos

No tema riscos em CSs, o ciclo de aplicação da simulação e otimização mostra que a maioria das modelagens usa modelos desenvolvidos a partir de métodos de otimização e de métodos MCDM, se comparados com os modelos de simulação. Em geral, os modelos de otimização assumem uma perspectiva mais normativa (SHAOYUN, 2012). O ciclo de aplicação pode envolver, separadamente ou combinados, modelos multicritérios, modelos de otimização e modelos de simulação. O perfil do modelo está fortemente relacionado com o uso de métodos otimizantes, teoria dos jogos e condições de equilíbrio, métodos que incluem, por exemplo, múltiplos critérios, otimização multiobjetivo e programação estocástica.

Abordagens de simulação e sistemas de suporte à decisão poderiam ser mais exploradas na gestão de riscos em CSs. A maioria das aplicações de modelagens agrupa modelos genéricos ou caracterizados a partir de um segmento econômico da CS (indústria ou serviço). Uma análise cruzada mostra que os modelos genéricos utilizam a otimização pura em menor escala, simulação via otimização, simulação e otimização via simulação. Poucos modelos baseados no mundo real envolvem o ciclo otimização via simulação (OLIVEIRA et al., 2019), bem como os modelos de otimização parametrizados com dados secundários ou estudos de casos ilustrativos (WEI-HUA et al., 2011), considerando setores econômicos, tais como químico (LI; REN; WANG, 2016), gás e bioenergia (FAZLI; MAVI; VOSOOGHIDIZAJI, 2015), entre outros. Os estudos de casos são amplamente utilizados em aplicações baseadas no mundo real. A suposição para o uso de modelos genéricos em CSs pode ser explicada pela complexidade das CSs, acessibilidade e disponibilidade dos dados.

Um dos objetivos críticos dos modelos de simulação e otimização é melhorar o desempenho das variáveis ligadas aos riscos, minimizando riscos e/ou custos, maximizando os lucros, ou definindo parâmetros para as variáveis de decisão. Geralmente, a melhoria no desempenho é obtida por métodos de otimização (SAWIK, 2016). Kim (2013) e Olson e Wu (2011) testaram e avaliaram cenários, parâmetros e estratégias de resposta aos riscos. Elleuch, Hachincha e Chabchoud (2013) aplicaram os métodos AHP e Função de desejabilidade para escolher cenários de risco e definir a melhor estratégia de resposta. Já Tuncel e Alpan (2010) usaram métodos estatísticos e simulação para testar abordagens estratégicas de gestão do risco.

Analisar efeitos e impactos provocados pelos riscos em CSs foi objetivo buscado por outros autores (CHEN; XIAO, 2015; LIU, 2013). Wu et al. (2013) exploraram os efeitos e impactos do balanço entre os riscos de ruptura e políticas de estoques. Métodos multicritérios foram utilizados para apoiar o processo decisório nas atividades de classificar, selecionar e avaliar temas sobre riscos, lançando mão de sistemas de indicadores de avaliação (CHENG; WANG, 2015), *ranking* de riscos (FAZLI; MAVI; VOSOOGHIDIZAJI, 2015), e outros.

Em alguns artigos o objetivo primário é compreender o funcionamento de um sistema ou ocorrência do evento de risco e prever resultados potenciais produzidos pelo modelo. Xie et al. (2009) investigaram o comportamento de riscos a partir de um sistema de alerta precoce para riscos internos na logística de pequenas e médias empresas. Já Xu et al. (2014) usaram um modelo baseado em redes neurais para prever os riscos em uma cadeia logística de frios.

## 2.6.2 Simulação em cadeias de suprimentos

A modelagem e simulação são ferramentas poderosas para aperfeiçoar processos a partir do desenvolvimento de modelos conceituais e computacionais. Um modelo é elaborado a partir do comportamento do sistema real e suas interações, com objetivos e funções que regulam seu funcionamento, assumindo características, por vezes, dinâmicas e complexas (PIDD, 2003), tais como, as CSs. Os modelos de simulação permitem reproduzir o comportamento dinâmico dos arranjos com a finalidade de simular ganhos ou benefícios (HENNIES et al. 2014) frente aos riscos (ABDELKAFI et al., 2009).

Ingalls (1998) sinaliza a importância da simulação na modelagem de CSs para investigar o desempenho (TAYLOR et al., 2002) ou fornecer os subsídios relevantes sobre características comportamentais e operacionais dessas redes (CHATFIELD; HARRISON; HAYYA, 2006). Para Lee, Cho e Kim (2002) a simulação é uma ferramenta analítica efetiva para representar a CS, considerando a natureza estocástica de seus elementos.

Segundo Altioek e Melamed (2007) a modelagem e simulação servem para responder questões do tipo *What-if*. Ou seja, o que ocorreria se alterar níveis de capacidade de sistemas, implantar medidas de produtividade em sistemas de produção, aumentar um turno de trabalho, entre outras aplicações. Banks et al. (2004) abrangem objetivos, como: testar sistemas complexos, verificar soluções analíticas, servir propósitos pedagógicos, e outras. Para Robinson (2004), muitos sistemas de operações estão interconectados e sujeitos à variabilidade e complexidade. Todavia, modelos de simulação são capazes de representar estas características exibidas pelos sistemas. Assim, a modelagem e simulação podem ser úteis aos gestores de CSs para prever desempenhos, comparar alternativas e determinar seus efeitos, por exemplo.

A SED é um tipo de simulação bastante utilizado, caracterizado pela mudança instantânea no estado das variáveis do sistema (LEE; CHO; KIM, 2002). Todavia, existem restrições de uso quando o processo é de natureza contínua ou quando a CS é bastante complexa. Na simulação tipo contínua o estado das variáveis muda no tempo (BANKS et al., 2004; SOKOLOWSKI; BANKS, 2009). A simulação baseada em agentes é uma técnica relativamente recente que vem sendo usada para modelar sistemas complexos caracterizados por interações e agentes autônomos (MACAL; NORTH, 2010), suprindo certas limitações apresentadas pela SED.

Outros tipos de simulação podem ser utilizados, como: simulação de Monte Carlo (ALTIOK; MELAMED, 2007), sistemas dinâmicos (MACAL, 2010), e demais. O desenvolvimento de modelos de simulação é auxiliado pelo uso de softwares. Robinson (2004) aponta três opções para a criação do modelo computacional: planilhas (MS Excel<sup>®</sup>), linguagens de programação (C<sup>++</sup>, Java, Fortran) e softwares especialistas, os tão conhecidos pacotes comerciais (Arena<sup>®</sup>, Promodel<sup>®</sup>, Flexsim<sup>®</sup>), cuja função é atuar como simuladores. Para Petrovic, Roy e Petrovic (1998) os modelos de simulação e os simuladores para CSs são criados para apoiar o processo decisório, especialmente quando existe incerteza no ambiente.

A modelagem e simulação caracterizam-se por ser uma disciplina sistemática com corpo de conhecimento, teoria e metodologias (SOKOLOWSKI; BANKS, 2009) elaboradas a partir de inúmeras áreas. O clássico artigo de Mitroff et al. (1974) demonstra um modelo desenvolvido quando a pesquisa operacional emergia como área. Nele, os autores destacaram quatro fases: conceitualização, modelagem, resolução de problemas e implantação. Essas fases representam o ciclo de pesquisa. A partir das contribuições dos autores, uma revisão sobre metodologias de pesquisa na área de gestão de operações foi realizada por Bertrand e Fransoo (2002) para alinhar os modelos quantitativos às quatro fases, categorizando-os em: axiomático-descritivos (AD), empírico-descritivos (ED), axiomático-normativos (AN) e empírico-normativos (EN).

Nos modelos AD, o modelo conceitual, usualmente fundamentado na literatura, é convertido em modelo científico. Nos modelos ED, baseados no mundo real, um modelo conceitual é criado (conceitualização), traduzido em linguagem computacional (modelagem) e confrontado com a realidade do sistema (validação), com o fim de compreender o funcionamento da CS e comprovar a validade prática das modelagens. Já nos modelos tipo AN uma solução para a modelagem do problema é requerida e envolve o ciclo modelagem conceitual – modelagem – resolução do modelo, sugeridos para modelar sistemas complexos. Modelos EN abrangem todo o ciclo: conceitualização – modelagem – resolução do modelo – implantação. Modelos axiomáticos podem ser generalizados na simulação como modelos genéricos (teóricos) e os modelos empíricos desenvolvidos a partir do mundo real (sistema real).

A aplicação de modelos genéricos com características axiomáticas tem sido frequente, pois em dadas situações o sistema real está inacessível ou por razões outras não pode ser modelado (ROBINSON, 2004).

As CSs são complexas devido à natureza estrutural de suas operações e à malha de interações entre os membros, dificultando modelagens baseadas em CSs reais. Por essas e outras razões, o desenvolvimento de modelos teóricos axiomáticos, caracterizados ou não, cuja abstração é passível de conversão computacional, parece ser justificado. Assim, esses modelos podem ser formulados a partir de uma representação padrão da CS.

Os ciclos de aplicações ilustrados por Mitroff et al. (1974) e adaptados por Bertrand e Fransoo (2002) envolvem um processo metodológico e sistemático de implantação utilizado ao longo dos anos no campo da modelagem e simulação. A maioria das aplicações inclui as principais fases. Todavia, não raro, as modelagens conceituais não são consideradas pelos autores. O Quadro 14 ilustra abordagens e etapas úteis à implantação da modelagem e simulação.

Quadro 14 – Etapas úteis à implantação da modelagem e simulação

<b>Autoria</b>	<b>Nº</b>	<b>Etapas</b>
Altiok e Melamed (2007)	9	Introdução, descrição do sistema, análise dos dados de entrada, descrição do modelo de simulação, verificação e validação, análise dos dados de saída, resultados da simulação, modificações e sugestões, conclusões e recomendações.
Balci (2012)	11	Formulação do problema, especificação dos requerimentos, modelagem conceitual, especificação da arquitetura, projeto das especificações, integração dos submodelos, modelagem computacional, resultados da simulação, apresentação dos resultados, certificação do modelo computacional, repositório do modelo computacional certificado.
Banks et al. (2004)	12	Formulação do problema, configuração dos objetivos e planejamento do projeto, modelagem conceitual, coleta de dados, translação do modelo, verificação, validação, projeto de experimentos, execução e análise do experimento, análise da necessidade de mais rodadas, documentação e relatório, implantação.
Montevecchi et al. (2010)	3	Concepção, análise e implantação.
Robinson (2004)	7	Modelagem conceitual, desenvolvimento do modelo conceitual, coleta e análise dos dados, codificação do modelo, experimentação, implantação, verificação, validação e confiança.
Rossetti (2016)	6	Definição do problema, estabelecimento de medidas de desempenho para avaliação, geração de soluções alternativas, classificação de soluções alternativas, avaliação e interação durante o processo, execução e avaliação da solução.

Fonte: Produção do próprio autor

O estado da arte no tema simulação em CSs mostra que os modelos puros de simulação são em maioria descritivos (LONG; ZHANG, 2014). Modelos normativos (PETROVIC; ROY; PETROVIC, 1998), cujos ciclos de pesquisa alcançam mais etapas, são menos utilizados, por exemplo, os modelos EN (PERSSON; OLHAGER, 2002).

Evidencia-se o uso intensivo dos modelos genéricos (CHAN; CHAN, 2006; CHATFIELD; HARRISON; HAYYA, 2006), com menor uso de modelos genéricos caracterizados (PITTY et al., 2008). Modelos baseados em CSs reais foram aplicados em segmentos produtivos, tais como: equipamentos e mobílias (EKSIUGLU et al., 2010) e esportes (LABARTHE et al., 2007). Porém, CSs reais envolvidas em um ambiente volátil e susceptível à presença de variáveis incontrolláveis pode estimular o uso de modelos genéricos.

Os objetivos desempenhados nos modelos de simulação para CSs são inúmeros e convergem para uma abordagem mais descritiva. Breur et al. (2013) e Reiner e Trcka (2004) procuraram testar e analisar efeitos; avaliar soluções, cenários, parâmetros ou priorizar aspectos, esses mais ligados às dimensões de desempenho (HIGUCHI; TROUTT, 2004), diferentemente de Albino, Carbonara e Giannoccaro (2007) e Minegishi e Thiel (2000), que focaram em buscar compreender comportamentos ou descrever problemas no sistema modelado.

Algumas modelagens em CSs buscaram melhorar o desempenho de variáveis (RYTILA; SPENS, 2006), auxiliar na tomada de decisão (van der ZEE; van der VORST, 2005), prever resultados ou validar experimentos nos modelos de simulação (SECO; VIEIRA, 2014; LI et al., 2005), elaborar modelagens para ensino e aprendizagem (WEBB; THOMAS; LIAO-TROTH, 2014), desenvolver jogos/simuladores (IANNONE; MIRANDA; RIEMMA, 2007), entre outros.

A SED tem sido amplamente empregada nos modelos. Carotenuto, Giordani e Zaccaro (2014) aplicaram este tipo de simulação para analisar o processo de distribuição em uma CS do óleo, sendo indicada para modelar alguns sistemas complexos. Entretanto, para modelos muito complexos a SED não é indicada, mesmo combinando variáveis discretas e contínuas.

Como vista em Ashayeri e Lemmes (2006), Kumar, Mukherjee e Kumar (2013), a simulação de sistemas dinâmicos permite modelar um grande número de entidades, conhecer o sistema; modelar sistemas e estruturas de alta complexidade e grandes níveis de incerteza e facilitar o uso de dados descritivos, numéricos e opinativos. Contudo, esse tipo de simulação não se adequa às decisões envolvendo otimização, previsão e comparação. A simulação de Monte Carlo (SMC) tem sido aplicada nas áreas de risco e previsões para produzir parâmetros ou distribuições probabilísticas, randomizar valores usados nos modelos ou apoiar a construção de cenários (CHEN; ZHANG; PANG, 2013), entre outras aplicações.

A simulação baseada em agentes vem sendo mais explorada nos últimos anos (WANG; JIA, 2013) por capturar a dinâmica de um evento ou tratar adequadamente agentes e variáveis em situações, cuja SED apresenta consideráveis limitações. Para Macal e North (2010) esse tipo de simulação é adequada para modelar sistemas interativos complexos, executadas em um ambiente dinâmico, consistindo de agentes autônomos que sejam autoguiados por decisões independentes. Simulações híbridas, aquelas que combinam mais de um tipo de simulação, como por exemplo, SED e Simulação contínua (HOLWEG et al., 2005), SED e simulação de sistemas dinâmicos (RABELO et al., 2007), SED/simulação baseada em agentes/simulação de sistemas dinâmicos (WANG et al., 2013), SED/Simulação de Monte Carlo (RIJGERSBERG et al., 2010), foram observadas na literatura.

Os modelos de simulação focados em jogos podem envolver mecanismos como, plataformas *online* (BÓNA et al., 2011), Macromedia Flash Player (SIDDIQUI; KHAN; AKHTAR, 2008), modelo SCOR<sup>®</sup> (WEBB; THOMAS; LIAO-TROTH, 2014), planilhas do MS-Excel<sup>®</sup> e *Visual Basic<sup>®</sup> for Applications* (FETTER; SHOCKLEY, 2014), e outros. Holweg e Bicheno (2002) criaram um jogo para explorar relações colaborativas e promover incrementos em uma CS.

A simulação numérica (WEN; OUYANG, 2013) tem como objetivo simular parâmetros que são modelados em expressões fechadas. A literatura também mostra aplicações de outros tipos de simulação, como: contínua (MURAYAMA et al., 2006), simulação estocástica (RODGER, 2014), e outras (NURMILAAKSO, 2004).

A literatura ilustra inúmeros softwares de simulação, destacando-se, por exemplo, linguagens de programação, tais como: JAVA/JADE (LONG; ZHANG, 2014), C++ (PETROVIC; ROY; PETROVIC, 1998), FORTRAN<sup>®</sup> (AMINI et al., 2012), Pascal<sup>®</sup> (BANERJEE et al., 2001); simuladores e pacotes comerciais: Anylogic<sup>®</sup> (WANG et al., 2013), Arena<sup>®</sup> (CARVALHO et al., 2012), ExtendSim<sup>®</sup> (POLAT et al., 2007), Promodel<sup>®</sup> (EKSIOGLU et al., 2010), Simul8<sup>®</sup> (VIDALAKIS; TOOKEY; SOMMERVILE, 2011), Simio<sup>®</sup> (HASSAN; ABDELSALAM, 2014), Simulink-Matlab<sup>®</sup> (ADHITYA; SRINIVASAN, 2010), Vensim<sup>®</sup> (LI; REN; WANG, 2016), Witness<sup>®</sup> (CAVALLI; GRIGOLATO; PELLEGRINI, 2011). Além dos softwares mencionados, outros especialistas em CSs foram registrados, como Supply Chain Guru<sup>®</sup> (MANJU; ESPER; STANK, 2014) e Beer Game<sup>®</sup> (HUDNURKAR; RATHOD, 2012); planilhas, como MS Excel (ASHAYERI; LEMMES, 2006) e simuladores para riscos, tais como: Crystal Ball<sup>®</sup> (XIE et al., 2009), Risk Solver<sup>®</sup> (LIEW; LEE, 2012), e @Risk<sup>®</sup>.

Ainda sobre simulação em CSs, o Quadro 15 ilustra alguns destaques observados no principal evento na área de simulação no mundo a partir da análise de artigos publicados pelo WINTER SIMULATION CONFERENCE, conhecido como WINTERSIM.

Quadro 15 – Simulação em cadeias de suprimentos segundo o WINTERSIM

Aspecto	Destaques
Natureza do modelo	<b>Modelos Axiomáticos Descritivos.</b> Persson et al. (2012) propuseram o uso do SCOR <sup>®</sup> como ferramenta para acelerar modelos de simulação em CSs.
Aplicação baseada no mundo real	<b>Modelos genéricos.</b> Ehm et al. (2011) criaram um modelo genérico para a CS de semicondutores usando uma técnica de redução da complexidade computacional.
Papel desempenhado pelo modelo	<b>Testar e avaliar cenários, projetos, modelos, parâmetros.</b> Jain et al (2013) criaram um modelo multi-resolução para analisar a sustentabilidade em uma CS.
Tipo de simulação	<b>SED.</b> Blanco et al. (2011) aplicaram a SED para avaliar a interação entre aspectos não lineares em uma CS.
Software	<b>Arena<sup>®</sup>.</b> Finke, Schmitt e Singh (2010) usaram o pacote para modelar produto e fatores de risco associados às rupturas e tópicos de qualidade em uma CS.

Fonte: Produção do próprio autor

Diversos livros destacam aplicações da simulação na logística e CSs reais (MERKURYEV et al., 2009), simulação em CSs com sistemas dinâmicos (CAMPUZANO; MULA, 2011), modelagem e simulação em CSs (REINER, 2009) e simulação focada em sistemas logísticos (VEEKE, 2003). Todavia, essas obras não tratam da relação modelagem e simulação e RLs. Habib (2011) aborda duas aplicações da simulação em CSs envolvendo riscos.

Três artigos sobre simulação em CSs abordam diretamente riscos (HOUSHYAR et al., 2013; WU et al, 2013; MANUJ; MENTZER; BOWERS, 2009). Já Saad e Kadiramanathan (2006) e Rodger (2014) estudaram uma medida de risco baseada em *stockout* e os gatilhos de riscos associados a pedidos em atraso, respectivamente. Sobre simulação em CSs e RLs, não foram observados trabalhos relacionando o modelo SCOR<sup>®</sup>. Portanto, a partir das prospecções sobre os modelos puros (*Stand-alone*) de simulação e RLs, constata-se a necessidade de se desenvolver procedimentos para a gestão de riscos que melhor aproveite o potencial da SED.

### 2.6.3 Otimização em cadeias de suprimentos

A otimização é o processo de encontrar condições que maximizem ou minimizem o valor de uma função (RAO, 2009) a partir da solução de um problema (LUENBERGER; YE, 2008) por meio de métodos científicos em situações que envolvam o processo de tomada de decisão.

Métodos e técnicas de programação matemática foram desenvolvidos ao longo dos anos como parte dos avanços na pesquisa operacional. O Quadro 16 resume abordagens usadas na área de otimização, algumas relacionadas a riscos e CSs.

Quadro 16 – Abordagens sobre otimização

Autoria	Destaques
Belegundun e Chandrupatla (2011)	Minimização unidimensional irrestrita; otimização irrestrita; programação linear; minimização restrita; funções penalidade, dualidade e programação geométrica; métodos de busca direta para otimização não linear; otimização multiobjetivo; programação discreta e inteira; programação dinâmica; otimização baseada em elemento finito.
Iqbal (2013)	Otimização gráfica; otimização matemática; programação linear; otimização discreta; otimização numérica.
Luenberger e Ye (2008)	Programação linear; problemas irrestritos; minimização restrita.
Nocedal (2006)	Otimização irrestrita; métodos de busca em linha; métodos de região viável; métodos gradientes conjugados; métodos Quasi-Newton; otimização irrestrita em larga escala; cálculos derivativos; otimização sem derivação; problemas de mínimos quadrados; equações não lineares; otimização restrita; programação linear; algoritmos para otimização não linear restrita; programação quadrática; penalidade e métodos lagrangianos aumentados; programação quadrática sequencial; métodos de pontos interiores.
Rao (2009)	Técnicas clássicas de otimização; programação linear; programação não linear (restrita e irrestrita); programação geométrica; programação dinâmica; programação inteira; programação estocástica; controle ótimo e métodos de critérios de otimalidade.

Fonte: Produção do próprio autor

Os autores mencionados no Quadro 16 citam em seus livros as abordagens de otimização mais conhecidas na literatura. As abordagens expostas pelos autores contemplam um conjunto de métodos e técnicas. Esta subseção traz conceitos e mostra o estado da arte dos métodos de otimização, conforme o Quadro 17.

Quadro 17 – Conceitos das abordagens sobre otimização

Abordagens	Conceito
Abordagem heurística	Métodos emergentes baseados em características e comportamentos de sistemas biológicos, molecular, enxame de insetos e neurobiológicos.
Modelagem algébrica	Métodos baseados em cálculo diferencial para encontrar soluções ótimas de uma função contínua e diferenciável de várias variáveis.
Modelagem multicritério	Métodos para avaliar critérios conflitantes, cuja formulação (dados, função objetivo e restrições) é expressa em termos vagos ( <i>vague</i> ) ou linguísticos.
Modelos de redes	Abordagens para modelar estruturas em redes (grafos e fluxos) formadas por nós e arcos.
Otimização multiobjetivo	Métodos para lidar com múltiplos objetivos conflitantes e simultâneos sob um conjunto de restrições especificadas.
Programação dinâmica	Técnica matemática usada para decompor e otimizar um problema de decisão multistágio em uma sequência de estágios individuais.
Programação estocástica	Métodos para converter um problema estocástico ou probabilístico em seu equivalente determinístico resolvido por outras técnicas (programação linear).
Programação geométrica	Abordagem aplicada para minimizar funções que estão na forma de polinômios sujeitos a restrições do mesmo tipo.
Programação inteira	Métodos usados para tratar problemas cujas variáveis não são divisíveis, como frações, ou assumem valores binários.
Programação linear	Métodos usados para resolver problemas, cuja função objetivo e restrições são funções lineares das variáveis de decisão.
Programação não linear	Métodos para modelar problemas, cuja função objetivo ou restrições não se declaram como funções explícitas das variáveis ou são de difícil manipulação.
Programação quadrática	Abordagem usada para modelar uma função objetivo quadrática com restrições lineares, cujo problema é resolvido através de técnicas de programação linear.
Teoria dos jogos   Condições de equilíbrio	Tratamentos matemáticos para modelar relações de conflito e cooperação entre tomadores de decisão considerando estratégias de equilíbrio.

Fonte: Adaptado de Belegundun e Chandrupatla (2011), Nocedal (2006) e Rao (2009).

Os Quadros 18a e 18b mostram os métodos de otimização mais conhecidos de acordo com as abordagens mencionadas no quadro anterior.

Quadro 18a – Métodos de otimização Parte 1

Abordagem	Conceito
Abordagem heurística	Algoritmos genéticos, redes neurais, simulated annealing, Particle Swarm Optimization, Ant Colony Optimization
Modelagem algébrica	Cálculo diferencial – Multiplicadores de Lagrange, condições KKT, programação convexa, variação restrita.
Modelagem multicritério	Métodos AHP/ANP, Sistemas Fuzzy, TOPSIS, PROMETHEE, métodos baseados na Teoria Grey, MACBETH, PAPIKA.
Modelos de redes	Métodos do fluxo do custo mínimo, fluxo máximo, rede capacitada, teorema Max Flow – Min Cut, procedimento em árvore

Fonte: Adaptado de Belegundun e Chandrupatla (2011), Nocedal (2006) e Rao (2009).

Quadro 18b – Métodos de otimização Parte 2

Abordagem	Conceito
Otimização multiobjetivo	Pareto, programação MIN-MAX, Somas ponderadas, programação objetivo, abordagens interativas, funções preferência, análise conjunta, $\epsilon$ -Constraint.
Programação dinâmica	Método algébrico, método tabular.
Programação estocástica	Programação estocástica linear e programação estocástica não linear, programação estocástica geométrica.
Programação geométrica	Cálculo diferencial, desigualdade geométrica e aritmética, relação primal-dual, minimização restrita, programação geométrica complementar.
Programação inteira	Método de Gomory, programação zero/um; programação polinomial inteira, método Branch-and-Bound, programação discreta sequencial linear, função penalidade generalizada.
Programação linear	Método Simplex, dualidade, decomposição, análise de sensibilidade, método de transporte, método interior de Karmarkar, análise envoltória dos dados (DEA).
Programação não linear	Métodos de eliminação (e.g. busca exaustiva, Finabocci), métodos de interpolação (e.g. método de Newton), métodos de busca direta (e.g. busca randômica), métodos de busca indireta – descendente (e.g. gradiente conjugado), métodos diretos (e.g. gradiente reduzido generalizado - GRG), métodos indiretos (e.g. técnicas de transformação)
Programação quadrática	Programação sequencial quadrática, sistemas KKT.
Teoria dos jogos   Condições de equilíbrio	Modelo Stackelberg, condições de equilíbrio de Nash.

Fonte: Adaptado de Belegundun e Chandrupatla (2011), Nocedal (2006) e Rao (2009).

Métodos de otimização são amplamente utilizados em logística e CSs, tratando, por exemplo, sobre projeto de redes de CSs (PISTIKOPOULOS; GEORGEADIS; DUA, 2008), gestão de estoques e reposição (CHOI, 2014; DAVIS, 2016); transportes e localização de instalações (PIRIM; AL-TURKI; YILBAS, 2014), coordenação (CHOI; CHENG, 2011), entre outros. Uma busca na base Web of Science a partir de um *ranking* das TOP 100 citações, quase 50% abordam o tema projeto de redes de CSs. Esse tópico tem grande relevância para ajudar na modelagem e resolução de problemas de localização de instalações (BOWLING; PONCE-ORTEGA; EL-HALWAGI, 2011), estoques (SADEGHI et al., 2013), reconfiguração de redes e CSs (YOU; WASSICK; GROSSMANN, 2009), e outros.

A otimização multiobjetivo tem sido empregada para determinar pontos de equilíbrio entre variáveis de decisão, notadamente quando existem objetivos conflitantes, muito comuns em CSs envolvendo, por exemplo, valor – variância – CVaR (QU et al., 2014). Cruz, Nagurney e Wakolbinger (2006) usaram a teoria de Nash (1950) em uma complexa CS para satisfazer as condições de otimalidade e de equilíbrio relacionadas a preços e transações de produtos. O modelo Stackelberg *Game* foi implantado por Han, Dong e Sun (2014) visando determinar a demanda do varejista e a quantidade de produção do fornecedor.

Modelos de programação estocástica de dois estágios foram aplicados em diversos artigos, envolvendo otimização robusta com a atitude de aversão ao risco (HAHN; KUHN, 2012) e CVaR – maximização de valor presente líquido (CARNEIRO; RIBAS; HAMACHER, 2010). Métodos heurísticos (HUANG et al., 2013), programação linear (KIRILMAZ; EROL, 2017), modelagem multicritério (LI, 2012), modelagem algébrica (TSAO, 2011), programação inteira/quadrática (GAONKAR; VISWANADHAM, 2007) e não linear (TABRIZI; RAZMI, 2013) também foram evidenciadas na literatura sobre riscos em CSs.

Os objetivos das modelagens matemáticas são diversos, tais como: melhorar o desempenho do sistema, variáveis de decisão e da parametrização (ARCELUS; PAKKALA; SIRINIVAN, 2002), analisar impactos e efeitos (XIAO; YANG, 2008) ou suportar o processo decisório (LI, 2012). Os modelos lineares, a programação linear (CUI et al., 2005) e a programação linear inteira mista – MILP (YANIK, 2015) apresentam amplas aplicações, sendo menos frequentes os modelos de programação inteira mista não linear - MINLP (HAMEDANI; JABALAMELI; BOZORGI-AMIRI, 2013). Govindan e Fattahi (2017) aplicaram uma função multiobjetivo, que pode ser usada para inúmeras finalidades, como reduzir riscos e minimizar impactos em custos (NAGURNEY; NAGURNEY; LI, 2015) e balancear lucro e riscos (SHU et al., 2014). A maioria dos artigos observados modelam os riscos na função objetivo (LIU; HE, 2013) do problema, por exemplo, para representar o comportamento probabilístico do risco. Todavia, a função risco nas restrições do problema foi menos observada (CUI et al., 2005).

Os softwares mais usados nos modelos de otimização suportaram as soluções computacionais dos problemas modelados, destacando-se os programas CPLEX<sup>®</sup> - GAMS<sup>®</sup> e combinações (GOVINDAN; FATTAHI, 2017; SAWIK, 2015) e MATLAB<sup>®</sup> (LIU; WANG, 2015; XIAO; CAI; ZHANG, 2012). Linguagens de programação, como Fortran (CRUZ; NAGURNEY; WAKOLBINGER, 2006), C (KANG; KIM, 2012), JAVA (KIM, 2013) e softwares, como Dash Optimization's Xpress-MP (SODHI, 2005); Lingo (HAMEDANI; JABALAMELI; BOZORGI-AMIRI, 2013), Mathcad (XANTHOPOULOS; VLACHOS; IAKOVOU, 2012) e MS-Excel (KIRILMAZ; EROL, 2017), Super Decisions<sup>®</sup> (XIA; CHEN, 2011) e Yaahp<sup>®</sup> (CHENG; WANG, 2015), os dois últimos para modelos MCDM foram identificados nesta revisão.

#### **2.6.4 Simulação e otimização em cadeias de suprimentos**

Esta seção mostra algumas aplicações dos ciclos OvS e SvO em CSs, conforme Quadros 19a e 19b, que mostram o escopo do estudo, envolvimento do tema riscos, o tipo de simulação, a abordagem de otimização, o uso de metamodelagem e o tipo de acompanhamento (comunicação) usado no ciclo. Dos 63 trabalhos revisados, aproximadamente 81% utilizaram o ciclo OvS, 11 exploram a SvO e um artigo (CROSON et al., 2014) empregou a simulação e otimização. Filgueira e Almada Lobo (2014) desenvolveram uma taxonomia para os métodos híbridos de simulação e otimização, categorizando-os, conforme a estrutura hierárquica, em otimização com iterações baseadas em simulação; simulação com iterações baseadas em otimização; simulação e otimização alternada e simulação e otimização sequencial.

Quadro 19a – Metamodelos, riscos e cadeias de suprimentos Parte 1

<b>Autoria</b>	<b>Contexto</b>	<b>Risco</b>	<b>DOE</b>	<b>Simulação</b>	<b>Otimização</b>	<b>MM</b>	<b>Acoplamento</b>
Afshar-Bakeshloo et al. (2018)	CS	N	S	SED-SC	<i>Black Box</i>	S	MSR
Akbari e Karimi (2015)	CS	N	N	SMC	Programação linear	N	Relação saída/entrada (O/I)
Almeder, Preusser e Hartl (2009)	CS	N	N	SED	Programação linear	N	Banco de dados
Aslam e Ng (2016)	CS	N	N	SD	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Avci e Selim (2017)	CS	N	N	NM	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Azadeh e Alem (2010)	CS	S	N	SMC	Programação linear	N	Relação saída/entrada (O/I)
Azadeh et al. (2014)	CS	N	N	SD	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Bandaly, Satir e Shanker (2016)	SCRM	S	S	SMC	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Biswas e Narahari (2004)	CS	N	N	SOO-SED	Programação linear	N	Relação saída/entrada (O/I)
Bodon et al. (2011)	CS	N	N	SED	Programação linear	N	Relação saída/entrada (O/I)
Boulaksil, Fransoo e Halm (2009)	CS	N	N	APS	Programação linear	N	Relação saída/entrada (O/I)
Cancan, Junjiang e Xiaodong (2012)	CS	N	N	SBA-SMC	Teoria dos jogos   condições de equilíbrio	N	Algoritmo (Visual C++)
Chan e Zhang (2011)	CS	N	N	SED	Cálculo diferencial	N	Análise de sensibilidade
Chávez et al. (2017)	CS	N	N	SED	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Chavez, Castillo-Villar e Webb (2017)	CS	N	N	SED	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Chen et al. (2012)	CS	N	N	SED-SMC	Programação linear	N	Planilha (VBA)
Chiu e Lin (2016)	CS	N	S	SED	Programação linear	S	Modelos de regressão
Chu et al. (2015)	CS	N	S	SBA-SMC	Programação não linear	S	MSR
Croson et al. (2014)	RL	S	N	SED	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Dev, Shankar e Debnath (2014)	CS	N	S	SED	Programação linear	N	Projeto de Experimentos
Ding, Benyoucef e Xie (2006)	CS	N	N	SED	Abordagem heurística	N	Módulo de rede e várias regras
Dong e Leung (2009)	CS	N	N	NM	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Duan e Liao (2011)	CS	N	N	FB	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Elleuch, Hachincha e Chabchoub (2013)	GRCS	S	S	SED	Otimização multiobjetivo	N	AHP
Georgiadis e Athanasiou (2013)	CS	N	S	SD	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Hachincha (2011)	CS	N	S	Estocástica	Abordagem heurística	S	Redes neurais
He, Huang e Chang (2015)	CS	N	N	SED	Abordagem heurística	N	Algoritmos genéticos e PSO
Hlioui, Gharbi e Hajji (2015)	CS	N	S	SED	Metodologia de Superfície de Resposta	S	Modelos de regressão
Jung et al. (2004)	CS	N	N	SED-SMC	Programação linear e estocástica	N	Incorporado ao algoritmo
Kara e Dongan (2018)	CS	N	S	SBA	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada (O/I)
Khataie, Bulgak e Segovia (2011)	CS	N	N	SD	Programação objetivo	N	Sistema de suporte à decisão
Kim, Kim e Kiniry (2018)	CS	N	N	SBA	<i>Black Box</i> e outros	N	Relação saída/entrada (O/I)

Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 19b – Metamodelos, riscos e cadeias de suprimentos Parte 2

Autoria	Escopo	Risco	DOE	Simulação	Otimização	MM	Acoplamento
Komoto et al. (2011)	CS	N	N	SED	Otimização multiobjetivo	N	Algoritmo Genético
Liao e Chang (2011)	CS	N	S	NM	Abordagem heurística	S	Métodos de Taguchi
Longo (2012)	CS	N	S	SOO	Metodologia de superfície de resposta	S	Modelos de regressão
Mele et al. (2006)	CS	N	N	SBA	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada
Merkuryeva, Merkurjeva e Vanmaele (2011)	CS	N	S	SED	Abordagem heurística	S	Modelos de regressão e GA
Mortazavi, Khamseh e Azimi (2015)	CS	S	N	SBA	Aprendizagem forçada - Programa	N	Algoritmo
Nikolopoulou e Ierapetritou (2012)	CS	N	N	SBA	Programação linear	N	Relação saída/entrada
Niranjan e Ciarallo (2011)	CS	N	S	SED	Programação linear	N	Relação saída/entrada
Park e Kim (2016)	CS	S	M	SED	Abordagem heurística	N	Algoritmo evolucionário MQB
Piewthonggam, Pathumnakul e Setthanan (2009)	CS	N	N	SN	Programação matemática	N	Relação saída/entrada
Ponsignon e Mönch (2014)	CS	N	S	SED	Abordagem heurística	N	Algoritmos
Rabelo, Sarmiento e Jones (2011)	CS	N	N	SD	Abordagem heurística	N	ADE
Raj e Lakshminarayanan (2008)	CS	N	N	SED	Abordagem heurística	N	Algoritmo GPS
Reddy et al. (2017)	CS	N	N	SBA	Abordagem heurística	N	Algoritmos
Sahay e Ierapetritou (2013)	CS	N	N	SBA	Otimização multiobjetivo	N	Relação saída/entrada
Sahay e Ierapetritou (2014)	CS	N	N	SBA	Programação linear	N	Relação saída/entrada
Sahay e Ierapetritou (2015)	GRCS	S	N	SBA-SMC	Programação linear	N	Relação saída/entrada
Sahraeian, Geranmayeh e Rezaei (2013)	CS	N	S	SMC	Abordagem heurística	S	Modelos de regressão
Sammons Jr et al. (2007)	CS	N	N	LING P	Programação não linear	N	Integração de processos
Shukla et al. (2010)	CS	N	S	SED	Abordagem heurística	S	Modelos de regressão
Singh, Chu e You (2014)	CS	N	N	SBA	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada
Smew, Young e Geraghty (2013)	CS	N	S	SED	Otimização multiobjetivo	S	Processo Gaussiano
Wan et al. (2003)	CS	N	N	SED	Abordagem heurística	N	Relação saída/entrada
Wan, Pekny e Reklaitis (2005)	CS	S	S	SMC	Programação linear	S	LSSVM
Wery et al. (2018)	CS	N	N	NM	NM	N	Outputs/Inputs
Woerner, Laumanns e Wagner (2018)	CS	N	N	NM	Programação linear e quadratic - MIP	N	Algoritmo
Wu e Olson (2008)	CS	S	N	SMC	Programação linear	N	Modelagem e Algoritmo
Xanthopoulos e Iakovou (2009)	CS	N	N	SMC	Programação linear e objetivo	N	Relação saída/entrada
Ye e You (2016)	CS	N	S	SMC	Programação não linear e <i>trust-region</i>	S	Modelos de regressão
Yoo, Cho e Yücesan (2010)	CS	N	N	SED	Abordagem heurística	N	Algoritmos integrados
Yoo, Hong e Kim (2009)	CS	N	N	SED	Abordagem heurística	N	Função amplificação

**Nota:** N (Não); S (Sim); OCBA (Optimal computing budget allocation); MM (Metamodelo); MEA (Análise dos efeitos principais); GA (Algoritmos genéticos); MAS (Sistemas multiagentes); ADE (Accumulated Deviations from Equilibrium); LSSVM (Least Square Support Vector Machine); SN (Simulação numérica); MQB (Multiple Queen-Bee); ADE (Desvios acumulados do equilíbrio); GPS (Busca generalizada de padrões); NM (Não mencionada); LING P (Linguagem de Programação); MIP (Programação Inteira Mista).

Fonte: Produção do próprio autor

Quanto ao escopo de aplicação dos métodos híbridos em CSs, três trabalhos (BANDALY; SATIR; SHANKER, 2016; ELLEUCH; HACHINCHA; CHABCHOUB, 2013; SAHAY; IERAPETRITOU, 2015) focaram em GRCS e apenas um artigo envolveu RL (CROSON et al., 2014). No entanto, cinco outros estudos envolveram o tópico riscos. Os métodos híbridos combinam duas ou mais abordagens de simulação e otimização. A experimentação planejada (DOE) foi uma estratégia usada por 31,74% dos trabalhos (AFSHAR-BAKESHLOO et al., 2018; YE; YOU, 2016) conforme os Quadros 19a e 19b.

As principais funções dos métodos de simulação são testar, avaliar e priorizar determinados aspectos relacionados à geração de parâmetros e distribuições de probabilidade, análise de cenários e fornecimento de soluções computacionais e melhorar o desempenho de variáveis de decisão (SAHAY; IERAPETRITOU, 2014). Elleuch, Hachincha e Chabchoub (2013) elaboraram uma proposta de simulação para cenários de mitigação aos riscos. Dessa forma, os modelos de simulação são geralmente descritivos elaborados a partir de CSs genéricas.

Os Quadros 19a e 19b mostram tipos de simulação aplicados em CSs, como SED (CHAVEZ; CASTILLO-VILLAR; WEBB, 2017); MERKURYEVA; MERKURYEVA; VANMAELE, 2011), a simulação baseada em agentes (KIM; KIM; KINIRY, 2018; SINGH; CHU; YOU, 2014), a SMC (BANDALY; SATIR; SHANKER, 2016; SAHRAEIAN; GERANMAYEH; REZAEI, 2013), a simulação de sistemas dinâmicos (ASLAM; NG, 2016; GEORGIADIS; ATHANASIOU, 2013) e simulações híbridas entre SED-SMC, SED-simulação contínua, SED-simulação orientada a objetos, e simulação baseada em agentes-SMC. Para riscos em CSs a SMC (AZADEH; ALEM, 2010) e SED (PARK; KIM, 2016) têm sido bastante usadas.

Os métodos de otimização focaram em melhorar o desempenho das variáveis nos modelos a partir de combinações com métodos de simulação, destaques para métodos evolucionários e metaheurísticos, como: redes neurais (HACHINCHA, 2011; YOO; HONG; KIM, 2009), algoritmos genéticos (AVCI; SELIM, 2017; KARA; DONGAN, 2018), Simulated Annealing (CHÁVEZ et al., 2017), PSO (REDDY et al., 2017), soluções Near-Optimal (GEORGIADIS; ATHANASIOU, 2013), Multiple queen-bee (PARK; KIM, 2016), algoritmo psicoclinal e sistema imunológico artificial (SHUKKLA et al. 2010), e outros. Os algoritmos genéticos foram registrados em mais de 15 trabalhos.

Outros métodos foram registrados: programação linear (BODON et al., 2011); programação não linear, algoritmo de plano de corte (CHU et al., 2015) e derivações, como a programação inteira mista – MIP (KLEMMT et al., 2009), não linear/MINLP (MELE et al., 2006) e linear/MILP (CHIU; LIN, 2016; SAHAY; IERAPETRITOU, 2015), Análise Envoltória dos Dados/DEA (DEV; SHANKAR; DEBNATH, 2014) e métodos aplicados sob comportamento probabilístico e condições de incerteza, como: programação estocástica (JUNG et al., 2004), método de enumeração (HUANG et al., 2013), modelos estocásticos baseados no problema do jornaleiro (XANTHOPOULOS; VLACHOS; IAKOVOU, 2012), programação do tipo *chance constrained* (WU; OLSON, 2008), cadeias e processos Markovianos (SCHELLER-WOLF; TAYUR, 2009), análise marginal incremental (TSE; TAN, 2012), entre outros.

Métodos como partição em rede (KIM; KIM; KINIRY, 2018) e partição aninhada (YOO; CHO; YÜCESAN, 2010), busca – local (DUAN; LIAO, 2011), gradiente (NIRANJAN; CIARALLO, 2011), busca direta/busca tabu (SHU et al., 2014) e busca padrão generalizada (RAJ; LAKSHMINARAYANAN, 2008) foram notados na literatura. Mortazavi, Khamseh e Azimi (2015) aplicaram o conceito de otimização baseada na aprendizagem forçada. Já Piewthongngam, Pathumnakul e Setthanan (2009) usaram a programação matemática, em linha com outros trabalhos mais analíticos que aplicaram, por exemplo, teoria dos jogos e condições de equilíbrio - *Stackelberg Game* (CANCAN; JUNJIANG; XIAODONG, 2012; CHEN; XIAO, 2015), o método Newton–Raphson e a aproximação de Taylor (LODREE JR; TASKIN, 2008; TSAO, 2011), cálculo diferencial (CHAN; ZHANG, 2011) e critérios Min-Max (BEN-TAL et al., 2011), basicamente.

Alguns trabalhos usaram métodos de otimização via *Black-box* com o OptQuest® (AFSHAR-BAKESHLOO et al., 2018), que é uma ferramenta comercial computacional de otimização. Além dos métodos observados, outros foram identificados, como otimização multiobjetivo e função desejabilidade (ELLEUCH; HACHINCHA; CHABCHOUB, 2013; SMEW; YOUNG; GERAGHTY, 2013), Metodologia de Superfície de Resposta (HLIOUI; GHARBI, HAJJI, 2015), método da região de confiança/ *Trust-region* (YE; YOU, 2016), programação-objetivo ponderada (KHATAIE; BULGAK; SEGOVIA, 2011), otimização robusta (HAHN; KUHN, 2012), programação geral intervalar (WANG; HSU, 2010), programação quadrática e análise de perturbação infinitesimal (WOERNER; LAUMANN; WAGNER, 2018), e técnicas pós-otimização, tais como: análise de cenários (WU; OLSON, 2008) e análise de sensibilidade baseada em simulação (FRAZZON et al., 2014).

Inúmeros métodos e modelos são utilizados para conectar a simulação à otimização e vice versa, como por exemplo, modelos de regressão envolvendo redes neurais (HACHINCHA; 2011), processos gaussianos (SMEW; YOUNG; GERAGHTY, 2013), metodologia de superfície de resposta (AFSHAR-BAKESHLOO et al., 2018; YE; YOU, 2016); arranjos experimentais de Taguchi (DEV; SHANKAR; DEBNATH, 2014; SHUKLA et al., 2010); sistema de suporte à decisão (KHATAIE; BULGAK; SEGOVIA, 2011); programação inteira mista e métodos heurísticos, como PSO e algoritmos genéticos (HE; HUANG; CHANG, 2015), técnicas de integração de processos (SAMMONS Jr et al., 2007); função transferência (YOO; HONG; KING, 2009); planilhas VBA e banco de dados (ALMEDER; PREUSSER; HARTL, 2009; AZADEH et al., 2014; CHEN et al., 2012), e outros.

As relações entre saídas (O) e entradas (I), como acoplamentos entre os modelos de simulação e otimização são amplamente utilizados (SAHAY; IERAPETRITOU, 2015; WERY et al., 2003). Outra forma de conexão bastante aplicada utiliza algoritmos, como vistos em Woerner, Laumanns e Wagner (2018), Mortazavi, Khamseh e Azimi (2015), parte desses usados para resolver os problemas de otimização, por exemplo, algoritmo de Lasserre (APPLEQUIST; PEKNY; REKLAITIS, 2000), algoritmo equilíbrio exato (NAGURNEY; NAGURNEY; LI, 2015), algoritmo HCSRIL (LE et al., 2013), decomposição de Benders (MARUFUZZAMAN et al., 2014), algoritmo busca raiz – NIA (LODREE Jr; TASKIN, 2008), algoritmo *proximal point* (QU et al., 2014), algoritmo *smart integrating* (SHU et al., 2014), algoritmos baseados nos métodos *Multi-Cut* e *Standard L-shaped* (YOU; WASSICK; GROSSMANN, 2009), algoritmos genéticos e MIP (FRAZZON et al., 2017), método de relaxamento (NOORAIE; PARAST, 2015), e outros.

As modelagens matemáticas e manipulações algébricas usam técnicas de cálculo integral, tais como: integração polytope (APPLEQUIST; PEKNY; REKLAITIS, 2000), programação bi nível (XU; MENG; SHEN, 2013), derivações (TSE; TAN, 2012), programação convexa (WU et al., 2013), propriedades teóricas e teoremas matemáticos (LODREE Jr; TASKIN, 2008; QU et al., 2014), multiplicadores de Lagrange (CRUZ; NAGURNEY; WAKOLBINGER, 2006), retro indução (HAN; DONG; SUN, 2014), programação cônica de segunda ordem (AZAD et al., 2014), condições KKT (CUI et al., 2005), integral de Leibniz e formulação variacional de desigualdade (NAGURNEY; MASOUMI; YU, 2012), entre outras.

Além dos métodos incluídos nos Quadros 19a e 19b, métodos multicritérios, como: Fuzzy-AHP (CHENG; WANG, 2015), DEMATEL-AHP (FAZLI; MAVI; VOSOOGHIDIZAJI, 2015), *Fuzzy Inference System* (PAUL, 2015), método baseado na Teoria Grey (PRAKASH, SONI; RATHORE, 2015), modelo *Cloud* (WEN; OUYANG, 2013), ANP (XIA; CHEN, 2011) foram utilizados, basicamente na fase de avaliação dos RLs.

Por fim, ferramentas como ALARP – o mais baixo possível (*As low as reasonable possible*), FMECA/FMEA, rede dinâmica, diagrama causa e consequência, Curva de Pareto, métodos HK (*Here and Know*) /WS (*Wait and See*), método bi seccional, regra de Simpson, integração de Romberg, Pareto *Optimal Cuts*, fronteira eficiente, região de confiança, árvore de decisão, método  $\epsilon$ -*Constraint*, horizonte de rolamento, entre outras, foram registradas nas revisões.

Para maiores detalhes sobre as várias abordagens envolvendo o ciclo simulação otimização, sugere-se consultar o artigo de Filgueira e Almada-Lobo (2014), que traz uma ampla revisão de inúmeros métodos, parte desses identificados nesta seção, e Sargent (1994), cujo autor faz uma categorização dos modelos híbridos de simulação e métodos analíticos em quatro classes. Para finalizar esta seção, os Quadros 19a e 19b mostram que um quinto dos trabalhos criaram metamodelos, já anteriormente comentados. Considerando os trabalhos sobre simulação e otimização em CSs, inclusos aqueles que tratam de riscos, não foi observada a relação entre os temas SCOR<sup>®</sup>, CVaR e SMD.

### **2.6.5 Metamodelagem, riscos e cadeias de suprimentos**

Um modelo de simulação pode ser bastante complexo, dificultando a compreensão da relação entre variáveis de controle (entrada) e variáveis de resposta (saídas). Os metamodelos podem simplificar as inúmeras interações entre saídas e entradas, tornando-se mais parcimoniosos e eficientes para conectar a simulação à otimização. Um metamodelo, para Banks et al. (2004), é uma aproximação simplificada do modelo simulado em termos de funções matemáticas, mais conhecido como *Surrogate Model* (WAN; PEKONY; REKLAITIS, 2005) ou modelo substituto - modelo do modelo (ROBINSON, 2004), criado a partir das saídas simuladas.

Kleijnen (2015) define um metamodelo como uma aproximação da relação entrada (I) e saída (O) que é definida pelo modelo de simulação subjacente. O processo de desenvolvimento de um metamodelo (WANG; SHAN, 2006) é denominado de metamodelagem e comumente é parte do estudo de simulação.

A metamodelagem proporciona benefícios, como simplificar e revelar a dinâmica do modelo (FRIEDMAN, 1996), acelerar a execução da simulação (ROBINSON, 2004), configurar, de modo rápido e adequado, soluções ótimas de Pareto (KIRSCHSTEIN, 2015). Todavia, uma das desvantagens é a imprecisão de alguns resultados (ROBINSON, 2004).

Embora tenha havido avanços na integração entre a simulação e otimização para as operações logísticas em CSs (MOTA; DE LA MOTA; SERRANO, 2015), a metamodelagem parece ser uma abordagem relevante para acoplar modelos, ainda que pacotes comerciais, tais como: Arena<sup>®</sup> e Promodel<sup>®</sup>, incluam suplementos como o OptQuest<sup>®</sup> e SimRunner<sup>®</sup>, destinados para otimizar variáveis de decisão baseadas nas saídas de um modelo simulado (MERKURYEV et al., 2009; ROSSETTI, 2016; YALAOUI et al., 2012).

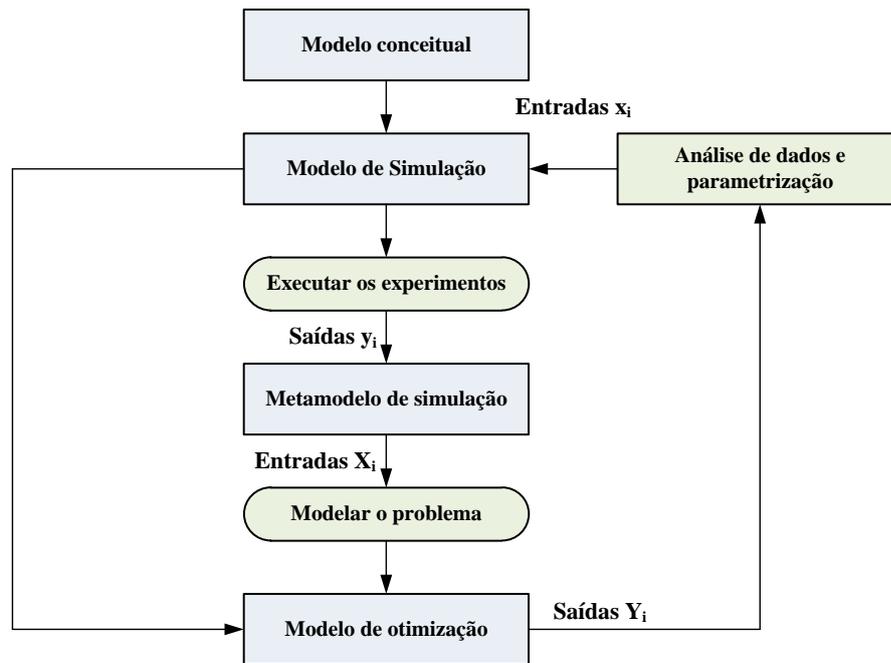
As respostas do modelo de simulação podem ser usadas diretamente para explorar o espaço amostral das variáveis de controle (KIRSCHSTEIN, 2015). Combinações de abordagens de otimização vem sendo adaptadas para propósitos de OvS, como a otimização multiobjetivo, realizada a partir de algoritmos genéticos, meta-heurísticas, métodos gradientes, aproximação estocástica, metodologia de superfície de resposta, busca por dispersão, busca randômica/tabu e outras. A integração entre modelos visa determinar, na maioria dos casos, as condições ótimas de operação do sistema modelado. Portanto, diversos problemas de OvS podem ser modelados através de metamodelos de simulação.

A transição entre modelos de simulação e otimização pode ser realizada e aproximada por um modelo polinomial e ajustada por técnicas de regressão, gerando-se um metamodelo. Várias abordagens podem ser usadas na metamodelagem em simulação e otimização, por exemplo, os modelos de regressão linear simples e múltipla (BANKS et al., 2004); algoritmos genéricos (MERKURYEV et al., 2009); modelos Kriging (KLEIJNEN, 2015); regressão multivariada adaptativa Spline (FRIEDMAN, 1996); redes neurais (ROBINSON, 2004); funções de base radial (MUÑOZ-ROJAS, 2016); MSR (CHOI; KANG, 2013); regressão do vetor de suporte (KIRSCHSTEIN, 2015); e outras.

Sahay e Ierapetritou (2016) aplicaram a abordagem Kriging para desenvolver um metamodelo envolvendo modelos de simulação e otimização em uma CS sob o efeito dos mecanismos de leilão. A simulação baseada em agentes foi usada para representar uma CS e o método livre de derivativos para determinar as capacidades ótimas de armazenagem a custo mínimo total.

Para Wang e Shan (2006) a metamodelagem envolve o projeto de experimentos (DOE), cujas funções polinomiais são usadas como superfícies de resposta ou metamodelos. A Figura 5 ilustra ciclos entre modelos de simulação e otimização envolvidos na metamodelagem.

Figura 5 – O processo geral de metamodelagem em simulação e otimização



Fonte: Produção do próprio autor

A representação gráfica da Figura 5 se enquadra na classificação proposta por Filgueira e Almada-Lobo (2014), que relaciona a estrutura hierárquica e o propósito da simulação. Para o caso desta tese, métodos baseados em metamodelos são utilizados para acoplar os modelos de simulação e otimização. O modelo de simulação deve ser elaborado de acordo com o modelo conceitual. Os dados de entrada ( $x_i$ ) são parametrizados no modelo de simulação, que após a devida validação estará apto para receber os experimentos, delineados com auxílio do DOE. As saídas ( $y_i$ ) do modelo de simulação servirão para construir o metamodelo de acordo com as abordagens aplicadas na literatura.

O metamodelo de simulação produz uma função de transferência que acopla os modelos de simulação e otimização. É a função objetivo com entradas ( $X_i$ ) para desenvolver a modelagem do problema a ser resolvido pelo modelo de otimização, que, por conseguinte fornecerá as saídas ( $Y_i$ ) para reparametrizar o modelo de simulação com as soluções mais adequadas. Por fim, as variáveis de decisão otimizadas são confirmadas no modelo de simulação.

Sobre os metamodelos ilustrados nos Quadros 19a e 19b, vários trabalhos aplicaram modelos de regressão (CHIU; LIN, 2016; HLIQUI; GHARBI; HAJJI, 2015; LONGO, 2012) para acoplar a simulação e otimização. A MSR foi observada em Afshar-Bakeshloo et al. (2018), Ye e You (2016), Chu et al. (2015) e Merkurjeva, Merkurjev e Vanmaele (2011) com ampla aplicação da ferramenta DOE, que também auxiliou a projetar arranjos experimentais de Taguchi (LIAO; CHANG, 2011; SHUKKLA et al., 2010) no processo de metamodelagem. Já Smew, Young e Geraghty (2013) usaram um metamodelo via Processo Gaussiano (modelo Kriging). Wan, Pekny e Reklaitis (2005) trataram de riscos a partir da aplicação do método LSSVM (*Least Square Support Vector Machine*) entre SMC e programação linear.

## **2.7 Conclusões do capítulo**

Este capítulo apresentou os conceitos que justificaram a proposta dos procedimentos desta tese, abordando temas e conceitos sobre CSs e operações logísticas, GRCSs e RLs. O estado da arte sobre métodos de simulação e otimização em RLs foi posicionado, emergindo diversos *insights* e *gaps* passíveis de pesquisas e evidenciando a falta de desenvolvimentos específicos para tratar os riscos no escopo de operações logísticas em CSs.

## CAPÍTULO 3 – MÉTODO DE PESQUISA

---

### 3.1 Classificação da pesquisa

A categorização do trabalho foi realizada segundo Cauchick Miguel et al. (2018) e Martins, Mello e Turrioni (2014), como mostram as seções subsequentes.

#### 3.1.1 Natureza da pesquisa

Esta pesquisa é aplicada, uma vez que fez uso de um estudo de caso publicado por Carvalho et al. (2012) para testar e validar os procedimentos metodológicos focados na gestão de RLs na CS estudada. Levantamentos de campo não foram realizados. Entretanto, o estudo de caso escolhido como objeto da pesquisa é uma CS real localizada na Europa. Para Martins, Mello e Turrioni (2014, p. 15), a pesquisa aplicada “caracteriza-se por seu interesse prático. Isto é, que os resultados sejam aplicados ou utilizados imediatamente na solução de problemas que ocorrem na realidade”. Nesta pesquisa, o desenvolvimento dos modelos baseado em dados reais foi obtido a partir de um caso prático, como destacado na seção 3.3 (Objeto de estudo).

#### 3.1.2 Abordagem do problema

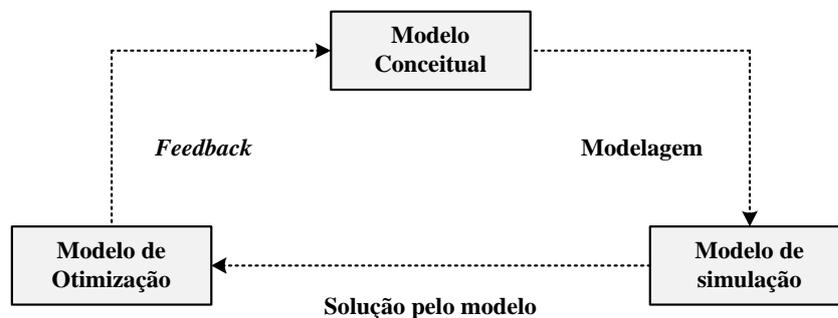
Esta pesquisa é quantitativa, pois emprega modelos de simulação e otimização, cujo objetivo é quantificar os efeitos provocados por RLs que podem afetar o desempenho global da CS. Trata-se de um problema de parametrização das variáveis de controle solucionado a partir da aplicação de abordagens quantitativas, tais como: OvS e metamodelagem. Conforme Kumar (2011), o estudo quantitativo compreende a medição da variação de um fenômeno, situação, problema ou assunto, especialmente se a informação está disposta sob a forma de variáveis quantitativas. Já Martins (2018) destaca que a mensuração de variáveis é uma das principais características da pesquisa quantitativa.

#### 3.1.3 Objetivos propostos

Este estudo é classificado como exploratório e normativo, respectivamente, pela densa revisão de literatura, realizada para construir a sistemática metodológica; e pelo desenvolvimento dos modelos de simulação e otimização, objetivando determinar uma parametrização adequada do sistema logístico da CSs.

A partir do ciclo metodológico baseado nas contribuições de Mitroff et al. (1974) e Bertrand e Fransoo (2002) para a gestão de operações e focado em modelagens quantitativas, classificou-se esta pesquisa como axiomática – normativa, abrangendo o modelo conceitual – criação do modelo científico na forma de modelo de simulação – determinação da solução pelo modelo de otimização, conforme Figura 6. Em linha com a visão de Cauchick Miguel et al. (2018), uma das principais características deste tipo de pesquisa é a definição de soluções para um problema novo. É o caso deste trabalho de tese, que busca melhorar o desempenho do sistema logístico a partir da redução do efeito do risco.

Figura 6 – Ciclo metodológico da pesquisa



Fonte: Adaptado de Mitroff et al. (1974), Bertrand e Fransoo (2002) e Martins, Mello e Turrioni (2014)

### 3.1.4 Método aplicado

O método desta pesquisa, conforme Quadro 14 e Figura 5, é a modelagem e simulação de um modelo computacional elaborado a partir de um modelo conceitual e abstraído de um sistema real ou da literatura (BANKS et al.; ROBINSON, 2004; MONTEVECHI et al., 2010). As etapas do método foram combinadas com base nas contribuições desses autores, ampliando o escopo para o método de modelagem e otimização, como mostra o Quadro 20. Nesta tese, o estudo se apoiou em uma CS realística estudada por Carvalho et al. (2012) em Portugal.

Quadro 20 – Etapas do método

<b>Etapas</b>	<b>Como?</b>
Elaborar o modelo conceitual	Elaborar o modelo conceitual a partir do problema do estudo de caso com auxílio de quadros descritivos e ferramentas gráficas.
Desenvolver a simulação	Desenvolver o modelo computacional com a ajuda de um pacote de software dedicado.
Projetar e executar experimentos	Projetar experimentos em software e executá-los no modelo de simulação para gerar as saídas devidas.
Criar a metamodelagem	A partir das saídas dos experimentos, cria-se o metamodelo de simulação baseado no método dos mínimos quadrados.
Estruturar o problema	Estruturar o problema de otimização com o objetivo de facilitar a aplicação do método de solução.
Aplicar o método de otimização	Conforme características do problema, deve-se escolher um método apropriado para otimizar os parâmetros do sistema.
Analisar os dados	As soluções propostas pelo modelo de otimização devem ser analisadas e confirmadas no modelo de simulação.
Verificar e validar os modelos.	As etapas que abrangem o desenvolvimento de modelos devem ser verificadas e validadas em termos de consistência e acurácia.

Fonte: Produção do próprio autor

### 3.1.5 Aspectos técnicos

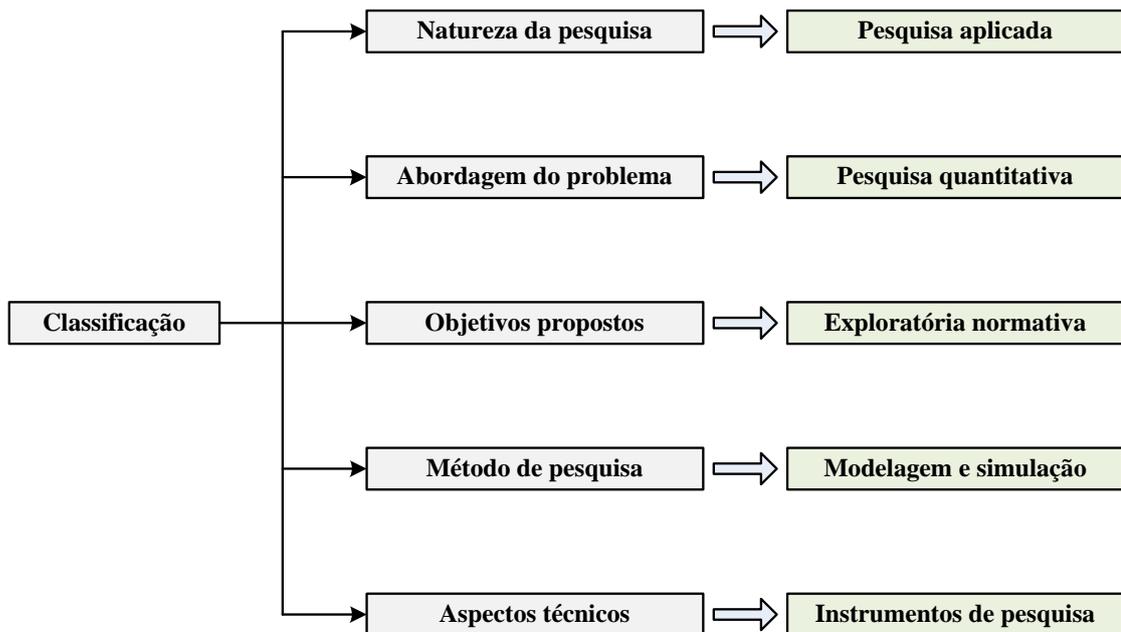
Uma pesquisa bibliográfica foi feita a partir de artigos, teses, dissertações e livros. A técnica da revisão sistemática de literatura (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003; DENYER; TRANFIELD, 2008; OLIVEIRA; LIMA; MONTEVECHI, 2016) foi usada nesta pesquisa, definida como “[...] um método reprodutível, explícito e sistemático para identificar, avaliar e sintetizar o corpo atual de trabalho já concluído e registrado, produzido por pesquisadores, acadêmicos e profissionais (FINK, 2014, p. 3)”. Esse método abrangeu os seguintes estágios: planejamento, exploração e seleção, análise e síntese e apresentação dos resultados.

Dados secundários podem ser obtidos a partir de publicações avulsas, revistas, livros, jornais e teses (MARTINS; MELLO; TURRIONI, 2014). Artigos selecionados para esta pesquisa foram empregados como fonte de dados secundários, compreendendo um conjunto de dados que serviram de base para o desenvolvimento dos modelos de simulação e otimização. Outra técnica de pesquisa aplicada foi a modelagem, usada para criar uma representação (PIDD, 2004) externa que visa fornecer informações úteis sobre o que está modelado. Quatro modelos foram desenvolvidos: modelo conceitual, modelo de simulação, metamodelo de simulação e modelo de otimização.

A simulação randômica foi usada para prover dados e parâmetros aos modelos de simulação e otimização, já que eles usam os dados de um sistema real já validado, e de dados aleatórios, provenientes da simulação numérica e randômica via método de Monte Carlo.

Outra técnica aplicada foi experimentação (KLEIJNEN, 2015; MONTGOMERY; RUNGER, 2014). Um projeto de experimentos foi empregado para desenvolver o metamodelo e executar cenários no modelo de simulação. A Figura 7 ilustra a classificação desta pesquisa, com as principais bases metodológicas que sustentaram a proposta deste trabalho de tese.

Figura 7 – Classificação da pesquisa



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.2 Justificativa do método selecionado

De acordo com Jonker e Pennink (2010) o método de pesquisa representa etapas específicas tomadas em uma determinada ordem – eventualmente rigorosa – durante a pesquisa. Para Gil (2006, p. 8) o método científico é “o conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos adotados para atingir o conhecimento”. O método principal desta pesquisa é a modelagem e simulação, recaindo sobre sistemas logísticos de CSs.

A simulação em CSs tem sido amplamente utilizada, essencialmente quando este ambiente é permeado por variância relacionada aos riscos e incertezas (CHRISTOPHER; PECK, 2004). Ela permite modelar interações, promover ganhos ao processo decisório e eficiente projeto de parâmetros de desempenho (SHUKLA et al., 2010; PERSSON; OLHAGER, 2002), suportar análises *What-If*, avaliar benefícios (TERZI; CAVALIERI, 2004), visualizar a dinâmica e promover melhorias em toda a cadeia (HOLWEG; BICHENO, 2002), identificar riscos em CSs (AQLAN; LAM, 2015), e outras vantagens.

As aplicações mostram o potencial da simulação na avaliação dos riscos, impactos e efeitos (AQLAN, 2016); quantificação e priorização de riscos (LIEW; LEE, 2012); compreensão da relação entre riscos e técnicas de mitigação (SCHMITT; SINGH, 2012); testes e análise de cenários e hipóteses para projetar alternativas de soluções (PENG; PENG; CHEN, 2014; TUNCEL; ALPAN, 2010); captura e reprodução do comportamento e de interações nas CSs sob influência de risco (LEE et al., 2016); representação de comportamentos complexos na CS frente aos riscos (SAHAY; IERAPETRITOU, 2014); geração de parâmetros, distribuições probabilísticas, amostras e comparação de desempenho (OLSON; WU, 2011), entre outros.

Persson e Araldi (2009) mencionam duas razões primárias para o uso da SED em análises SCM, tais como: (1) a possibilidade de incluir a dinâmica e (2) a simplicidade no processo de modelagem. Além dos pontos mencionados, as análises de CSs são facilitadas, já que a SED se candidata a capturar aspectos importantes como incerteza e complexidade, útil em estudos que consideram relações de interdependência no tempo. A revisão de literatura revelou que a SED é um dos métodos de simulação mais aplicados em CSs. Ela apresenta versatilidade, poder e destreza para lidar com sistemas complexos (KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2006). A aptidão em modelar sistemas e sua complexa rede de interações (ROSSETTI, 2016) faz dela adequada para capturar a dinâmica de comportamentos não lineares e intrincados.

### **3.3 Objeto de estudo**

Esta seção descreve aspectos sobre o objeto de estudo desta pesquisa, definido a partir de um modelo de CS real.

#### **3.3.1 Estudo de caso e modelo referencial**

O modelo de referência usado como base foi selecionado a partir de uma revisão de literatura em trabalhos que envolveram estudos de caso contendo modelos de simulação baseados em CSs reais, desde que validados e com dados secundários que pudessem ser aproveitados para testar a proposta metodológica. Alguns critérios foram aplicados para selecionar o modelo base, como: CS real, modelo válido, estudo de caso, disponibilidade e consistência de dados, envolvimento de dois ou mais elos da CS (um mínimo de três camadas) e associação com o modelo SCOR<sup>®</sup>. O modelo de Carvalho et al. (2012) foi o escolhido, baseado em um estudo de caso de uma CS automotiva portuguesa, cujas autoras investigaram como a simulação poderia ser usada para projetar CSs mais resilientes às perturbações no ambiente de atuação.

A CS em estudo apresenta um ambiente de produção enxuta, com pressões para minimização de custos e de *lead times*, cuja demanda é para produtos altamente customizados, tornando o arranjo mais vulnerável a perturbações. Devido à complexidade operacional e a diversidade de fornecedores, peças e componentes, os autores focaram o estudo em um subconjunto da CS, segundo a delimitação realizada pela montadora.

Um modelo de veículo foi definido e os fornecedores críticos de primeiro nível identificados em função de problemas (atrasos) relativos à entrega de componentes, causando perturbações na linha de produção da montadora. A produção de itens e componentes segue especificações demandadas pelo cliente final, sendo conduzida por uma política MTO (*Make to Stock*) que é um sistema produtivo para estoques. Os pedidos entre os membros são processados conforme a regra FIFO. Ou seja, os primeiros pedidos que chegam ao parceiro da CS são atendidos de forma imediata. Os fornecedores de primeiro nível identificaram seus fornecedores críticos (segunda camada). O levantamento de dados foi conseguido via entrevistas semiestruturadas, telefone e e-mail junto aos gerentes de operações e de logística.

Um dos principais membros envolvidos na pesquisa é a montadora, que tem como finalidade, na perspectiva SCM, tornar sua CS mais resiliente às rupturas para sustentar seus altos níveis de serviço aos seus clientes. A planta da montadora está localizada em Portugal, responsável pela produção de quatro tipos diferentes de veículos, cuja capacidade instalada pode atender a 180.000 unidades por ano. A montadora gerencia suas operações de acordo com princípios enxutos e *Just-in-Time*, além dos pedidos obtidos junto aos clientes.

O alto padrão de customização e o ambiente virtual de zero estoque (estoque mínimo) exigem uma eficiente coordenação do fluxo de material na rede, de forma a assegurar à montadora os componentes corretos entregues no tempo em atendimento aos pedidos dos clientes. Além disso, relacionamentos de longo prazo foram desenvolvidos com 670 fornecedores de forma a obter destes atores alta qualidade dos componentes e materiais a baixo custo, além de alta confiabilidade na entrega. A dinâmica operacional da CS é ilustrada no capítulo 5, de acordo com os procedimentos sistemáticos propostos por esta tese.

### **3.3.2 Distinções entre as pesquisas**

Esta seção objetiva demonstrar traços distintivos entre o modelo de Carvalho et al. (2012) e esta pesquisa, conforme algumas diferenças primárias delineadas no Quadro 21.

Quadro 21 – Diferenças entre as abordagens de pesquisa

Aspecto	Carvalho et al. (2012)	Esta pesquisa
Tema central	Projeto de cadeias de suprimentos resilientes	Gestão de riscos logísticos em cadeias de suprimentos
Objetivo primário	Avaliar os efeitos de estratégias de mitigação sobre o comportamento de uma CS perturbada	Mitigar riscos logísticos em cadeias de suprimentos a partir da otimização via metamodelo de simulação.
Enfoque da pesquisa	Aplicação da simulação - conteúdo	Aplicação de uma sistemática metodológica.
Abordagem ao risco	Não	Sim
Métodos científicos	Simulação – estudo de caso	Simulação – Metamodelagem – Otimização
Ciclo simulação/otimização	Não	Otimização via simulação
Métricas de desempenho	<i>Lead time</i> e custo total	Apropriadas e adaptadas do modelo SCOR®
SMD	Não	Sim (baseado no modelo SCOR®)
Medidas de risco	Não	Probabilidade versus custos
Estratégias de mitigação	Redundância e estratégia flexível	Selecionadas e testadas conforme criticidade do risco
Visão do sistema logístico	Não	Sim
Abordagens de melhoria	Não	DMAIC
Principal beneficiário	Empresa focal (montadora)	Empresa focal (montadora) e PSLs

Fonte: Produção do próprio autor

O modelo desenvolvido por Carvalho et al. (2012) é a referência utilizada como base para a construção de um modelo híbrido. Ou seja, ele combina um metamodelo de simulação e um modelo de otimização. Assim, o estudo de Carvalho et al. (2012) foi aplicado como objeto de estudo nesta pesquisa, constituindo-se o pano de fundo para testar a sistemática metodológica proposta. Os direcionamentos de pesquisa se distinguem em vários aspectos (Quadro 36). O tema desta tese abrange um procedimento sistemático elaborado para lidar com RLs em CSs, embora, em função de sua ocorrência, os eventos de riscos possam causar perturbações na cadeia sob a forma de impactos críticos. Portanto, esse estudo é desdobrado na: (1) criação de procedimentos apoiados por um conjunto de ferramentas; e na (2) aplicação da proposta com base em um modelo híbrido de CSs sujeito a ocorrência de RLs.

O enfoque no risco distingue as duas propostas, uma vez que nesta tese foi desenvolvida uma sistemática de tratamento de riscos que afetam ou são afetados pelo sistema logístico de uma CS. Este estudo amplia o escopo proposto por Carvalho et al. (2012) a partir de três métodos que se integram para atingir o objetivo proposto, fazendo uso da OvS, métodos integrados por uma metamodelagem via modelos de regressão. A OvS busca capturar a dinâmica operacional das operações logísticas, avaliando-se o comportamento dos efeitos de riscos na CS; gerar parâmetros ótimos para o sistema logístico e testar e avalia-los no modelo de simulação.

Esta pesquisa se utilizou das métricas do modelo SCOR<sup>®</sup> adaptando-as ao foco do estudo para avaliar o desempenho do sistema logístico no escopo da CS objeto de estudo. Os estudos se diferenciam na medida em que um SMD foi desenvolvido para acompanhar o desempenho da cadeia e de seus membros, permitindo a inserção de visibilidade e princípios sistêmicos ao processo de formação métrica requerida para a boa aplicação dos conceitos SCM.

O presente estudo enxerta eventos de RLs ao modelo desenvolvido por Carvalho et al. (2012), bem como amplia o conteúdo a partir da implantação de uma medida de risco para quantificar as perturbações ocasionadas. O enfoque se limita à determinação de estratégias selecionadas em função do perfil e efeitos dos RLs. Ou seja, devem-se alinhar os impactos dos RLs e a estratégia mais adequada para lidar com o perfil desses riscos. Os processos e atividades do sistema logístico foram agrupados e sistematizados para permitir uma análise mais precisa dos efeitos causados pelos RLs que afetam o comportamento da CS em estudo.

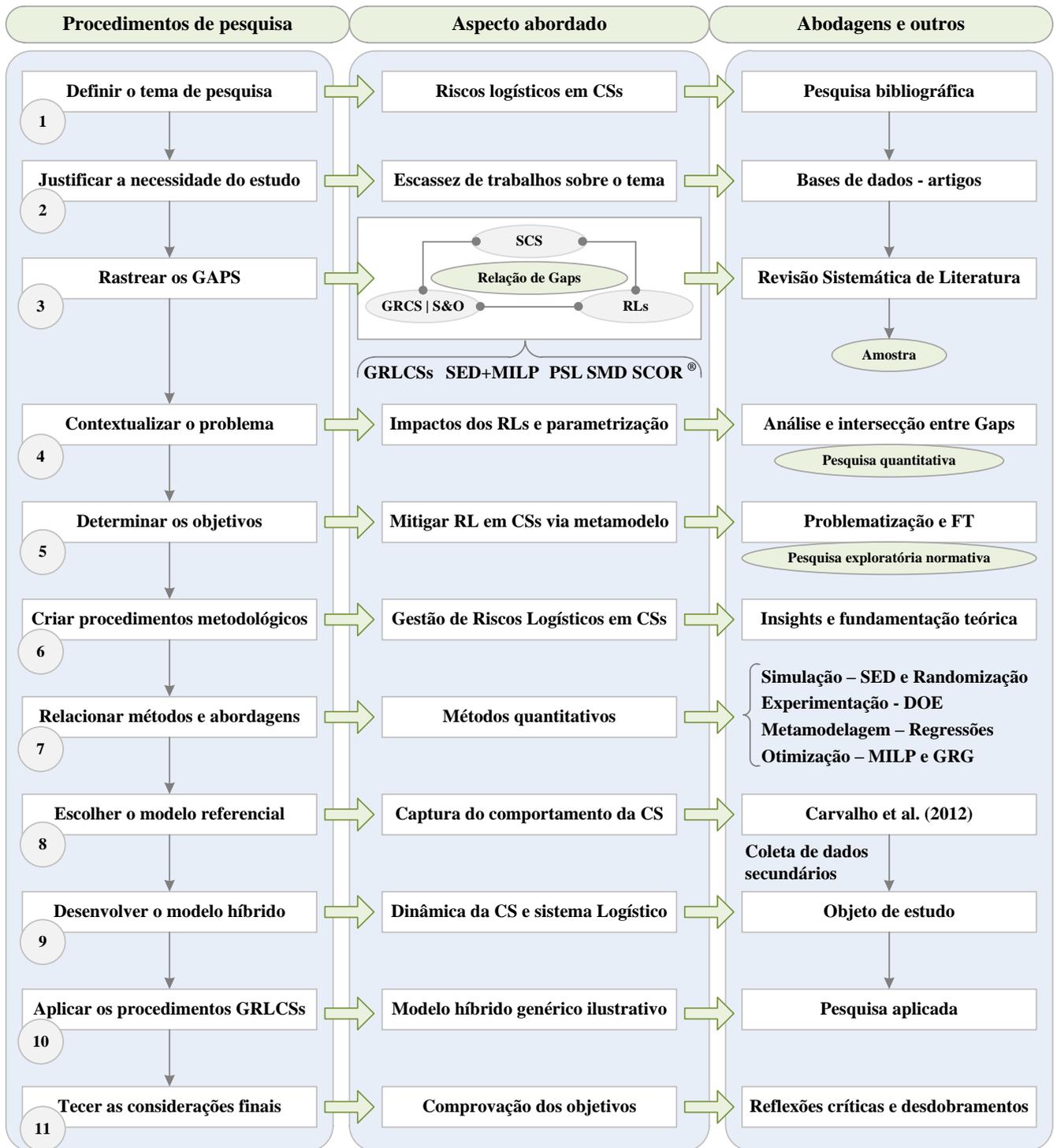
A sistemática metodológica proposta foi elaborada com base nas contribuições da abordagem de melhoria contínua DMAIC -  $6\sigma$ . Medir o sigma do processo logístico é uma interessante ação para estabelecer mecanismos sustentáveis de melhoria focados no aumento do nível de serviço ao cliente. Métricas de desempenho operacional associadas a RLs podem servir como padrões comparativos para alavancar ou estimular a eficiência da CS em atendimento aos requisitos demandados por seus clientes finais. A sistemática de gestão de riscos beneficia três atores do arranjo: a empresa focal, identificada como a montadora; os PSL's, executores do sistema logístico e os demais *players*, atendidos pelos PSL's.

### **3.4 Roteiro da pesquisa**

Esta seção aborda detalhes sobre atividades aplicadas, conforme roteiro de pesquisa utilizado neste estudo.

A Figura 8 divide três segmentos: (a) procedimentos de pesquisa, que descreve as etapas de execução da tese; (b) aspecto abordado, ilustrando o tópico explorado em cada estágio deste trabalho; (c) abordagem, que relaciona as abordagens técnicas aos segmentos (a) e (b).

Figura 8 – Roteiro geral da pesquisa



Fonte: Produção do próprio autor

Na primeira etapa o tema de pesquisa foi determinado como RLs em CSs e suas relações com os métodos de simulação e otimização. Edições especiais (NARASIMHA; TALLURI, 2009) publicadas em periódicos de grande credibilidade na comunidade científica, acadêmica e profissional sinalizaram a importância do tema na área de SCM como um “*hot-topic*” (tópico quente).

A segunda etapa tratou de justificar a necessidade do estudo a partir da investigação de três eixos de pesquisa, citados na subseção 1.3.1. Várias bases de busca de artigos publicados em periódicos internacionais foram devidamente exploradas visando comprovar a escassez de trabalhos relacionando os tópicos de pesquisa aos eixos investigativos.

Com a necessidade de pesquisa comprovada procedeu-se a terceira etapa, que foi rastrear os *gaps*. Este procedimento foi alcançado aplicando o método da revisão sistemática de literatura e abrangendo os eixos simulação em CSs, GRCSs – Simulação/Otimização – SMD e RLs, explorando uma amostra total de 421 artigos obtidos nas bases de dados mencionadas. Nesse sentido, cinco *gaps* foram detectados e relacionados individualmente e sucessivamente aos tópicos RLs, simulação e otimização, PSL, SMD e SCOR<sup>®</sup>, conforme mostrou o Quadro 1 supracitado.

A quarta etapa aborda a contextualização do problema, desenvolvida a partir de uma análise entre os *gaps*. Os potenciais dos métodos de simulação e otimização foram discutidos para quantificar os impactos de RLs sobre o desempenho de CSs. Uma segunda problematização focou-se na mitigação dos riscos a partir da utilização integrada dos métodos de simulação e otimização para parametrizar o sistema logístico da CSs de forma a melhorar o desempenho global do arranjo.

A quinta etapa, determinar os objetivos, foi realizada a partir da problematização e discussões situadas no Capítulo 2, fazendo uso intenso da pesquisa exploratória. O objetivo é mitigar RLs em CSs a partir do desenvolvimento de um metamodelo com características normativas, cujo processo de construção foi conduzido pelos procedimentos metodológicos de uma gestão sistemática de RLs em CSs, como ilustrada no Capítulo 4.

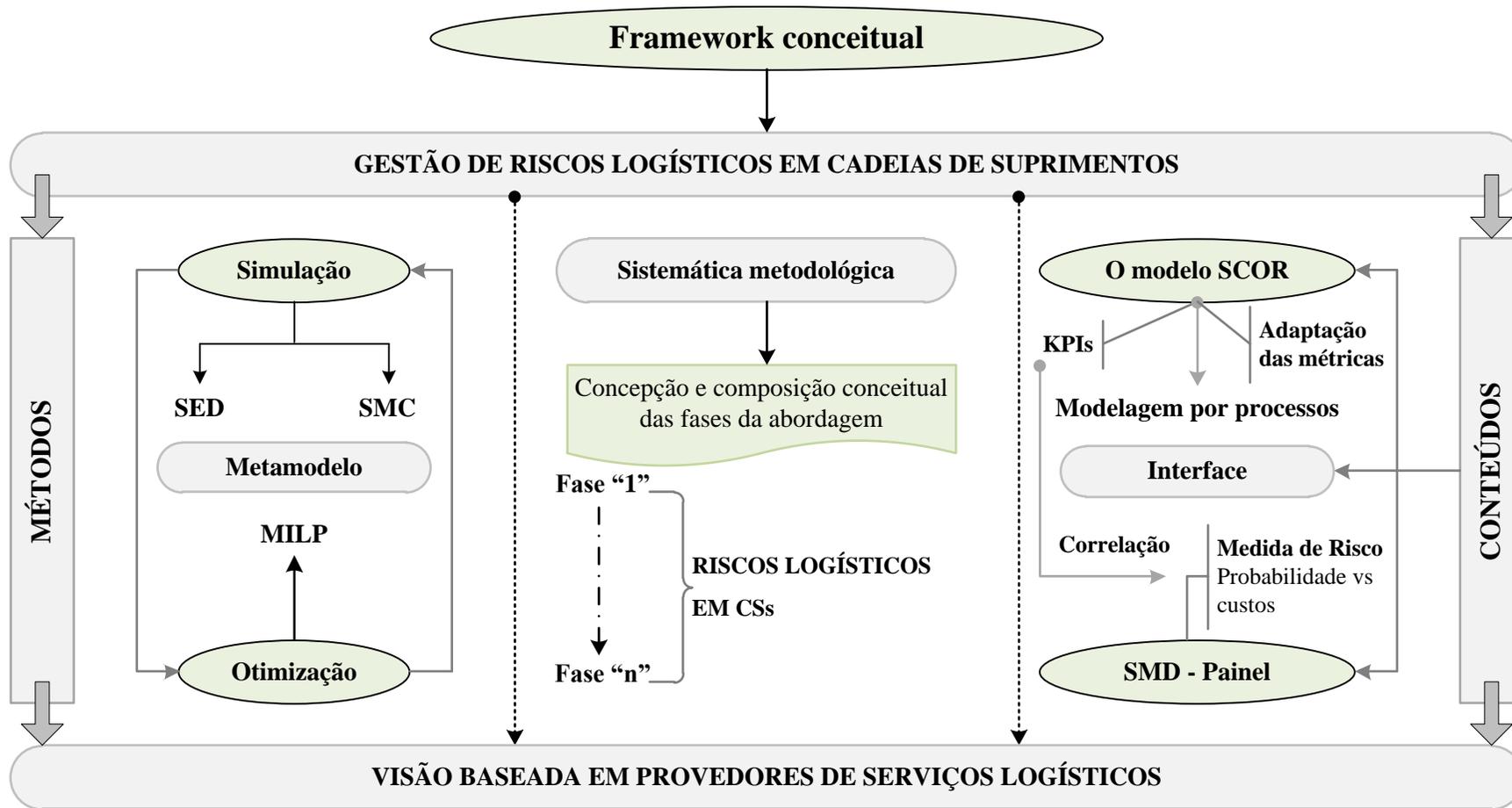
A sexta etapa, criar procedimentos metodológicos, é considerada o fundamento que sustenta esta tese, uma vez que estas atividades de GRLCSs orientam a execução sistemática de passos bem definidos focados no metamodelo de simulação e otimização responsável, em ordem, por capturar o comportamento do sistema logístico e as perturbações dos riscos no desempenho da CSs; e otimizar os recursos utilizados no funcionamento das operações logísticas, de tal modo que os riscos associados possam ser minimizados sem afetar o nível de serviço global do arranjo.

Na etapa sete, métodos e abordagens quantitativas foram selecionados para embasar a nova metodologia e responder aos objetivos do estudo em atendimento à problematização. Quatro abordagens foram eleitas para sustentar a metodologia: os métodos de simulação SED – SMC e simulação randômica; técnicas de arranjos experimentais através de DOE; modelos de regressão para metamodelagem; método MILP, usado na modelagem da otimização e o GRG (Gradiente Reduzido Generalizado), aplicado na solução do problema modelado. O produto das discussões em torno das relações entre os temas e os *gaps* em confronto com a literatura, fundamenta as bases da originalidade desta pesquisa (Figura 9).

De acordo com a Figura 9, a originalidade e ineditismo deste trabalho estão justificados em cinco vertentes. A primeira se baseia na elaboração de uma sistemática para gerenciar RLs em CSs apoiada por um guia de implantação que descreve passos para a consecução de cada fase. A segunda se apoia nos métodos SED/MCS para desenvolver o modelo computacional que reproduz as operações logísticas dos provedores nas CSs e simula os RLs. Já o metamodelo converte as saídas do modelo de simulação em entradas para o modelo de otimização, cujo problema é estruturado pelo método de otimização MILP.

Ainda conforme Figura 9, a solução do modelo fornece a parametrização ótima ao modelo de simulação. Na terceira vertente, conceitos sobre RLs e a sistemática de gestão são concebidos e desenvolvidos. A quarta (conteúdos) compreende o modelo SCOR<sup>®</sup> para fornecer e adaptar os KPIs e modelar os processos. O módulo de interface, por análise cruzada, adapta bases do SCOR<sup>®</sup> ao conceito de RL, apoiando o desenvolvimento do painel SMD – Índice de risco. Por último, a proposta de procedimentos de gestão dos RLs servirá como o esteio ao processo decisório dos PSLs.

Figura 9 – Originalidade da pesquisa



Fonte: Produção do próprio autor

O *framework* conceitual foi elaborado com base nas contribuições de trabalhos incrementadas por discussões e *insights* realizados nos capítulos anteriores, notadamente na fundamentação teórica. Inúmeras abordagens e destaques produzidos pela literatura foram pensados de forma a se desenvolver um conjunto de estágios sistemáticos e teoria de base aplicada ao tratamento dos RLs em CSs, indexando os benefícios dos métodos de simulação e otimização observados ao longo desse texto pelas revisões de literatura realizadas.

A etapa oito tratou da escolha do modelo referencial acompanhado de dados e informações, especialmente sobre as relações entre entradas e saídas, que pudesse ser recriado no software Arena<sup>®</sup> para reproduzir e capturar o comportamento de uma CS. O modelo desenvolvido por Carvalho et al. (2012) foi escolhido como referência para compreender o comportamento da cadeia e para integrar um modelo genérico do sistema logístico e riscos.

Na etapa 9 um modelo híbrido foi desenvolvido para segmentar a dinâmica operacional dos processos logísticos e inserir os cenários de riscos, de modo que a simulação computacional fornecesse resultados sobre os efeitos dos RLs no desempenho global da CS e do próprio sistema logístico. Assim, buscou-se desenvolver um modelo híbrido proposto para imitar o comportamento da CS automotiva, reproduzir as operações logísticas e modelar a dinâmica de RLs no sistema como um todo.

A etapa 10 envolveu a aplicação da sistemática de gestão de RLs em CSs a partir do modelo híbrido que foi combinado e integrado segundo os fundamentos de outros dois modelos. Nesta etapa, a principal finalidade foi ilustrar a aplicação da abordagem metodológica fase a fase, conforme os procedimentos descritos no Capítulo 4. Portanto, em consonância com os fins e natureza dese trabalho de tese, buscou-se produzir conhecimento científico e teórico novo, via pesquisa aplicada, mostrando a sua utilidade em cumprimento aos *gaps* rastreados.

Por fim, na etapa 11, as considerações finais sobre os resultados primários da pesquisa foram realizadas, versando sobre o alcance dos objetivos geral e específicos, as contribuições que a pesquisa promoveu para a Engenharia de Produção e para as áreas foco do estudo, limitações e restrições identificadas que não puderam ser superadas, reflexões críticas e sugestivas sobre o conteúdo e os procedimentos propostos, além de desdobramentos e lacunas para futuros estudos.

Portanto, considerando as onze etapas dos procedimentos metodológicos usados nesta tese, a distribuição dos passos por capítulo ficou assim segmentada: As etapas 1 – 5 estão dispostas no Capítulo 1; as etapas 3 e 6 estão indexadas no Capítulo 2; as etapas 7 – 9 estão percorridas no Capítulo 4; a etapa 10 está descrita no Capítulo 10, dos resultados; e por fim, a etapa 11 está apresentada no Capítulo 5, de considerações finais. Na sequência seguem comentários finais sobre os tópicos percorridos neste capítulo.

### **3.5 Conclusões do capítulo**

Este capítulo abordou a descrição de aspectos metodológicos que basearam à consecução dos objetivos estabelecidos nesta pesquisa. A classificação desse estudo foi tratada na seção 3.1, sendo: pesquisa aplicada, quantitativa, exploratória e normativa. A modelagem e simulação foi o método principal dessa pesquisa, auxiliado pela pesquisa bibliográfica, modelagem, simulação randômica, e pesquisa documental (dados secundários), projeto de experimentos e a otimização.

Na seção 3.2 o método da modelagem e simulação foi devidamente justificado, neste caso a SED, amplamente utilizada em problemas envolvendo CSs. Outras justificativas sustentam as capacitações e habilidades deste método em lidar com sistemas que exibem comportamentos dinâmicos e complexos, cujas malhas e conexões interagem entre si para atingir um dado objetivo. A potencialidade da modelagem e simulação em prever impactos potenciais do RL sobre o desempenho da CS é um importante fator que justifica a sua aplicação nesta pesquisa, além de outras vantagens do método que contribuiram para estabelecer os resultados obtidos.

O processo de seleção, desenvolvimento e aplicação do objeto de estudo, para as finalidades desta pesquisa, foi discutido na seção 3.3. Um estrato de mais 100 artigos foi utilizado para escolher um modelo de referência e integrá-lo a um modelo híbrido genérico de um sistema logístico, com suas operações e a dinâmica para dos RLs. O Quadro 21 ilustrou importantes distinções entre esta pesquisa e o modelo desenvolvido por esses autores.

Finalmente, a seção 3.4 descreveu sucintamente as 11 etapas dos procedimentos da pesquisa, conforme o *framework* ilustrado na Figura 8, seccionada em três segmentos: procedimentos, aspecto abordado e abordagem. Em suma, esse capítulo tratou dos aspectos metodológicos que sustentaram o desenvolvimento deste estudo.

## CAPÍTULO 4 – SISTEMÁTICA METODOLÓGICA

---

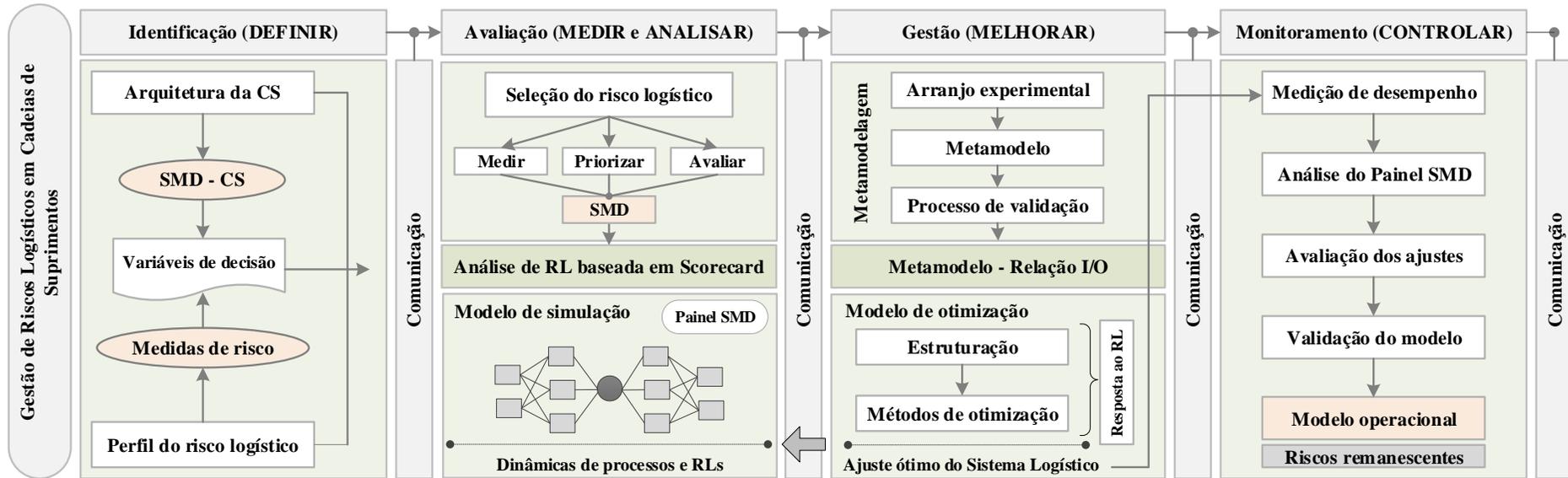
Ao longo deste capítulo é apresentado um *framework* que sintetiza as fases da gestão de riscos com base no DMAIC. Na sequência, cada fase é detalhada, sendo: identificação, avaliação, gestão e monitoramento do RL. O capítulo também aborda limitações da sistemática. Após esta seção, alguns aspectos sobre o modelo de gestão são discutidos, como escopo, extensão e profundidade. Por fim, o capítulo apresenta as contribuições da pesquisa.

### 4.1 Framework conceitual para a gestão de riscos logísticos

Esta subseção apresenta o *framework* responsável por orientar o processo de implantação dos procedimentos sistemáticos para gestão de RLs. A Figura 10 mostra a versão simplificada do *framework* conceitual. Esta sistemática foi desenvolvida com base nas diversas contribuições discutidas nos capítulos antecedentes. A abordagem DMAIC foi usada para relacionar as fases de implantação. A Figura 10 destaca o *framework* simplificado, estruturado em cinco fases: identificação, avaliação, gestão, monitoramento e controle do RL, e comunicação.

Conforme Figura 10, a primeira fase DEFINIR, trata da configuração de CSs, definição do perfil do RL e das principais variáveis de decisão. Na fase MEDIR e ANALISAR, o RL é medido, ranqueado e avaliado para se determinar quais riscos mitigar. A análise deve ser feita com base em escores que classificarão o tipo e gravidade do RL por meio do SMD. Após a seleção dos riscos mais críticos, o modelo de simulação contendo o sistema logístico na CS será construído para reproduzir a dinâmica e criticidades dos RLs com ajuda de um painel SMD. Na fase MELHORAR, responsável pela mitigação do RL, um arranjo experimental deve ser planejado para auxiliar no desenvolvimento do metamodelo de simulação, que por sua vez, deverá ser validado para confirmar a sua consistência e precisão. Com o metamodelo devidamente validado e ajustado, suas saídas (O) servirão como entradas (I) para estruturar o modelo de otimização, a ser resolvido por métodos adequados ao problema. Alternativas de soluções devem ser geradas para reduzir o efeito do RL. Isso se dá pelas sugestões de novas configurações para as variáveis de decisão. Essas configurações devem ser testadas no modelo de simulação para confirmar a minimização do risco. Na fase CONTROLAR, o RL deve ser medido e analisado para ratificar a robustez da resposta ao risco, resultando em um modelo operacional que será adotado para preservar a solução. Os RLs remanescentes deverão ser mitigados. Todas as fases e suas atividades são suportadas pelo processo de comunicação.

Figura 10 – *Framework* simplificado dos procedimentos sistemáticos



Fonte: Produção do próprio autor

Assim, considerando a complexidade de CSs e a natureza das operações logísticas, a proposta foi elaborada para simular a dinâmica do sistema logístico, reproduzir os impactos dos RLs e permitir a aplicação de métodos de otimização para melhorar os mecanismos de resposta aos riscos utilizados pelos PSL's.

## **4.2 Detalhamento das fases da sistemática**

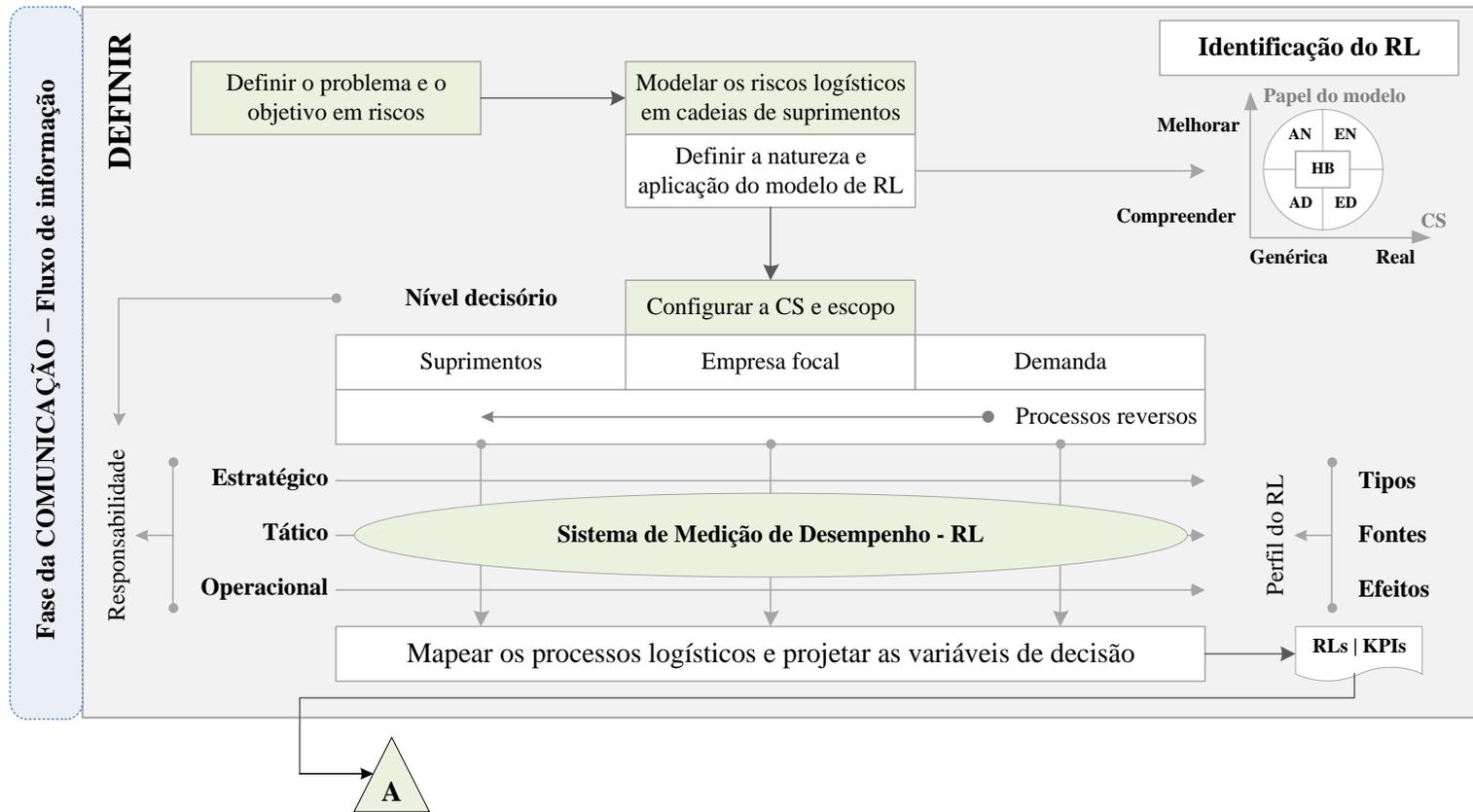
Esta seção detalha os procedimentos operacionais usados nesta tese sobre a implantação das fases da nova sistemática metodológica. Ela expande os estágios descritos no *framework* geral (seção 4.1). Outros *frameworks* foram desenvolvidos para melhorar a gestão de riscos em CSs e o processo de tomada de decisão. As Figuras 11 e 14 -16 mostram *frameworks* das etapas de identificação (DEFINIR), de avaliação (MEDIR e ANALISAR), de gestão (MELHORAR) e monitoramento (CONTROLAR) do RL, ilustrando em maiores detalhes os passos da proposta em cada estágio de execução.

### **4.2.1 Identificação do risco logístico (DEFINIR)**

Conforme Figura 11, o primeiro passo abrange a definição do principal problema e o objetivo a ser atingido pela sistemática para tratar os riscos que mais afetam o sistema logístico na CS. O nível de criticidade do risco deve ser avaliado em termos de impactos e perdas para a definição do objetivo, podendo melhorar o desempenho global da CS e a eficiência do sistema logístico; testar e avaliar alternativas de soluções, ou classificar aspectos; compreender o funcionamento do sistema logístico e o comportamento dos riscos; analisar efeitos e impactos causados pelos RLs; aperfeiçoar o processo decisório; prever possíveis resultados potenciais de acordo com o perfil das variáveis; definir e implantar estratégias de respostas aos riscos, entre outros.

O próximo passo trata da modelagem do RL para determinar as características e a natureza do modelo a ser desenvolvido associando o objetivo estabelecido. Três possibilidades podem ser usadas como base do modelo: modelo baseado em uma CS real; modelo de uma CS genérica ou um modelo híbrido. Modelos axiomáticos estão relacionados estreitamente à CS genérica, enquanto modelos empíricos estão mais vinculados à CS real. Após a definição do modelo, a CS deve ser mapeada e configurada para suportar a modelagem conceitual (Figura 12).

Figura 11 – Framework estendido da fase definir



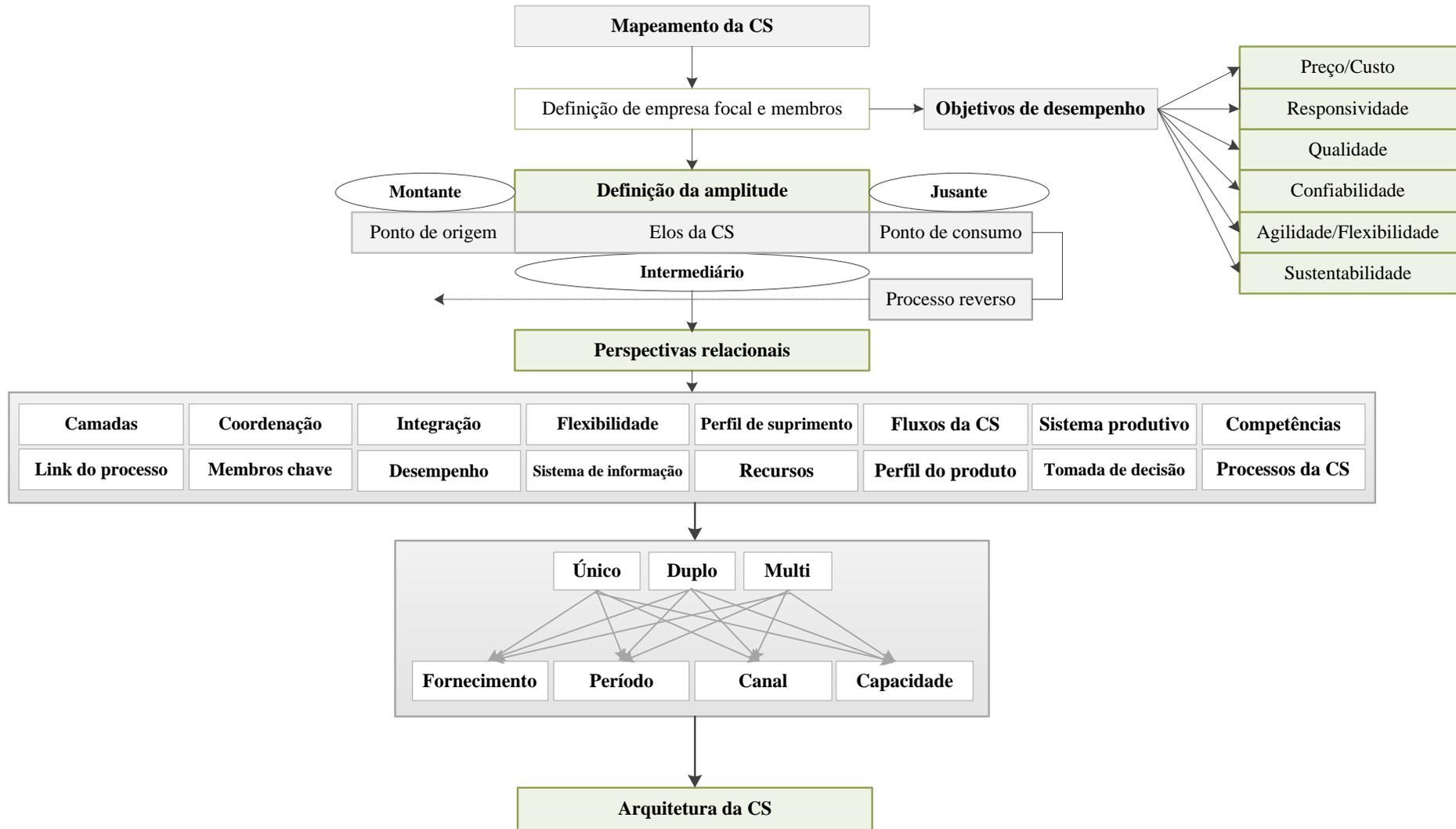
Fonte: Produção do próprio autor

A empresa líder da CS, os membros chave e os objetivos de desempenho devem ser definidos, esses últimos devido à necessidade da informação para o SMD. O analista deve decidir sobre o escopo (amplitude) da CS cuja modelagem deve abranger, do ponto de origem ao ponto de consumo, incorporando a estrutura de fluxo reverso. As camadas a serem modeladas devem ser indicadas (montante e jusante). Conforme Figura 12 a CS pode ser mapeada por dezesseis independentes perspectivas, tais como: membros da CS, camadas, relações dos processos de negócio, níveis de integração, flexibilidade na CS, sistemas informacionais, competências na cadeia, tipos de produto, fluxos envolvidos, SMD, recursos, estratégias dos sistemas de produção, processos decisórios, processos de negócio, coordenação e relacionamentos, entre outros tópicos que podem ser incorporados ao *framework*, dependendo da modelagem.

O passo seguinte é determinar os níveis (único, duplo e múltiplo) relacionados aos seguintes aspectos: canais de distribuição, suprimentos, período a ser considerado no modelo, número de camadas, *mix* de produtos e capacidade dos recursos, como instalações. Após os referidos passos, a arquitetura da CS é projetada, visando suportar a construção do modelo conceitual e facilitar a modelagem do sistema logístico e do SMD, conforme Figura 13. A informação sobre a CS é útil para parametrizar o sistema logístico, cujo foco é executar a função logística. Dependendo do modelo de simulação, o analista deve considerar relevantes decisões, como: processos logísticos, a rede logística, o sistema de informação logística (SIL), recursos e capacidades, relacionamentos estratégicos (tais como: PSLs), abordagem de gestão aplicada, serviço ao cliente e nível desejado de atendimento e estratégia operacional.

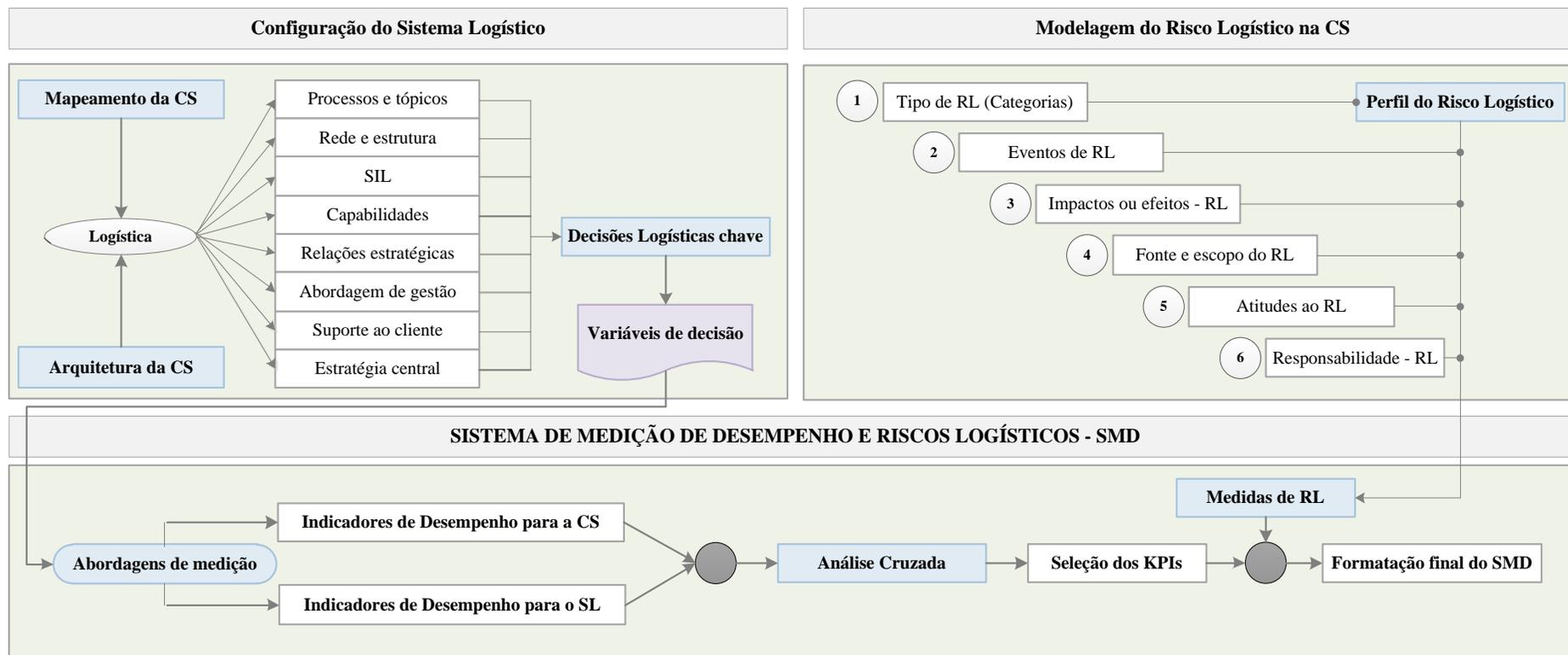
Riopel, Langevin e Campbell (2005) apresentam um quadro com 48 aspectos relacionados às decisões logísticas mais importantes, que orientam a modelagem de variáveis de decisão para a área no modelo de simulação e otimização. É necessário definir as variáveis independentes (entradas) e dependentes (saídas) a serem incluídas ao sistema de desempenho logístico. Neste caso, as variáveis podem ser contínuas, discretas ou híbridas. O projeto experimental pode ajudar a filtrar as variáveis mais importantes. A modelagem dos RLs é uma etapa crucial para definir o perfil e características operacionais do risco. Conhecer o risco é uma atividade crítica, já que o SMD deve sinalizar os efeitos dos RLs sobre o comportamento da cadeia de acordo com a sua caracterização. Na revisão de literatura ficou evidenciada a falta de uma abordagem para classificar RLs. Uma classificação para RLs em CSs foi criada a partir de contribuições existentes na literatura (RANGEL; OLIVEIRA; LEITE, 2015), expandindo o escopo da classificação proposta por Cavinato (2004), conforme os Quadros 22 e 23.

Figura 12 – *Framework* para o mapeamento da cadeia de suprimentos



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 13 – *Framework* do sistema de medição de desempenho para riscos logísticos



Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 22 – Uma classificação para riscos logísticos

<b>Categoria</b>	<b>Definição</b>
Desempenho operacional	Riscos associados às falhas causadas pelos processos logísticos impactando no desempenho de operações e eficiência do fluxo físico na CS.
Sistema de informação logística	Riscos relacionados à gestão do fluxo de informação, penalizando o processo decisório e reduzindo o desempenho e integração dos processos logísticos na CS.
Financeiro	Riscos de integridade do fluxo financeiro responsável por manter as operações logísticas e a sustentabilidade dos provedores de serviços logísticos.
Capabilidade logística	Riscos associados aos recursos e estrutura operacional requerida para a operação do sistema logístico.
Relacional	Riscos associados aos relacionamentos e aos mecanismos de colaboração e coordenação utilizados pelos membros da CS e os provedores de serviços logísticos.
Terceirização logística	Riscos relacionados ao perfil e características de desempenho dos provedores de serviços logísticos (PSLs).
Segurança e proteção	Riscos que envolvem a proteção e segurança de bens acabados, ativos, materiais, pessoas e outros recursos úteis às operações logísticas.
Infraestrutura logística	Riscos derivados da macroestrutura e rede estrutural que são utilizadas pelas operações do sistema logístico.
Sistema de gestão	Riscos relativos às decisões e procedimentos usados no planejamento, implantação e controle do sistema logístico nos níveis estratégico, tático e operacional.
Ambiental	Risco exogenous associados a fatores que estão fora do escopo e controle do sistema logístico na CS.
Riscos da CS	Riscos provocados a partir das interações entre a CS e as operações executadas pelo sistema logístico.

Fonte: Produção do próprio autor

O tipo de RL deve ser classificado conforme o Quadro 23. Os impactos desses riscos devem ser levantados. Falhas no desempenho operacional, excedentes ou perdas, danos ambientais e outros efeitos podem ser vinculados a impactos financeiros, comumente usados para avaliar a consequência do risco. O analista deve definir o escopo de ocorrência, extensão e fonte do risco, determinando ponto de origem, ponto de detecção e duração do evento do RL. A atitude do *player* ao risco deve ser avaliada, além da atribuição aos que conduzem o sistema logístico de responsabilidade pela execução e controle de estratégias respostas ao RL.

O próximo passo é selecionar os modelos de medição de desempenho relacionados ao sistema logístico e a CS, uma vez que diferentes métricas podem ser usadas. Algumas metodologias podem ser aplicadas para definir as métricas, tais como: o modelo SCOR<sup>®</sup>, a abordagem do GSCF (LAMBERT; POHLEN, 2001), BSC – *Balanced Scorecard* (KAPLAN; NORTON, 2006), e outras abordagens (BEAMON, 1999; GUNASEKARAN; PATEL; TIRTIROGLU, 2001). Uma análise cruzada deve ser realizada para selecionar os KPIs mais compatíveis aos objetivos do SMD.

Quadro 23 – Subcategorias de potenciais riscos logísticos

<b>Categoria</b>	<b>Subcategorias</b>
Desempenho operacional	Transporte, estoques, armazenagem, manuseio de materiais, embalagem de bens acabados, processamento do pedido, carregamento e descarregamento, processo de logística reversa.
Sistema de informação logística	Gestão da informação, interfaces entre processos, sistemas integrados de gestão, sistemas de suporte à decisão, tecnologias, equipamentos, software, hardware, pessoas.
Financeiro	Precificação, custos logísticos, ativos, crédito, investimentos, capital, lucros, renda, pagamentos, fluxo de caixa, custo de propriedade, câmbio, falência, fundos, débitos, rentabilidade.
Capabilidade logística	Ativos logísticos, capacidade, flexibilidade, recursos, tais como: pessoas, máquinas e equipamentos, habilidade e <i>know-how</i> , competências, estrutura organizacional.
Relacional	Parcerias, contratos e acordos, cooperação, colaboração, seleção de operador logístico, sistema de medição de desempenho, visibilidade, integração, compartilhamento de recurso.
Segurança e proteção	Acidentes, contrabando, roubo, corrupção, fraude, pirataria, falsificação, manuseio de materiais perigosos, fogo.
Terceirização logística	Procedimentos de seleção para os provedores de serviço, contratos, acordos, aspectos geográficos-legal-políticos, desempenho operacional, capacidades, flexibilidade, mecanismos de penalização e compensação.
Infraestrutura logística	Modais de transporte, centros de armazenagem e distribuição, canais de distribuição, transporte multi e intermodal, portos, aeroportos, ferrovias, dutovias, hidrovias, estações de transferência, locação de instalações.
Sistema de gestão	Projeto da estratégia, gestão do conhecimento, habilidades, experiência, definição dos objetivos, modelagem e implantação de soluções, comprometimento organizacional, estrutura e gestão de sistemas, planos de ação.
Ambiental	Legal, político, econômico, regulatório, trabalho (greves), aspectos culturais, competitividade, rupturas (desastres naturais e ambientais, guerra, terrorismo, considerações sobre o tempo, epidemias e pandemias), relações com <i>stakeholders</i> .
Riscos da CS	Suprimento (disponibilidade de material, preenchimento do pedido, custos de aquisição, falhas do fornecedor), demanda (mercado, previsão, requisitos do consumidor, recebíveis), processo (compras, produto, marca e reputação, sistema de produção, capacidade, inovação, locação de instalações), configuração da CS (características dos membros da CS, suprimento global, terceirização,).

Fonte: Produção do próprio autor

A análise do perfil do RL deve ajudar na configuração final do SMD, já que medidas de riscos devem ser inseridas no sistema alinhadas com os KPIs, de forma a capturar o comportamento do risco e seus impactos sobre o desempenho da CS. A integração entre modelagem dos RLs, arquitetura da CS e configuração do sistema logístico é um dos requisitos críticos para o desenvolvimento do SMD. Os passos nesta seção permitem definir os processos mais críticos, responsáveis por causar vulnerabilidade logística em CSs.

#### 4.2.2 Avaliação do risco logístico (MEDIR e ANALISAR)

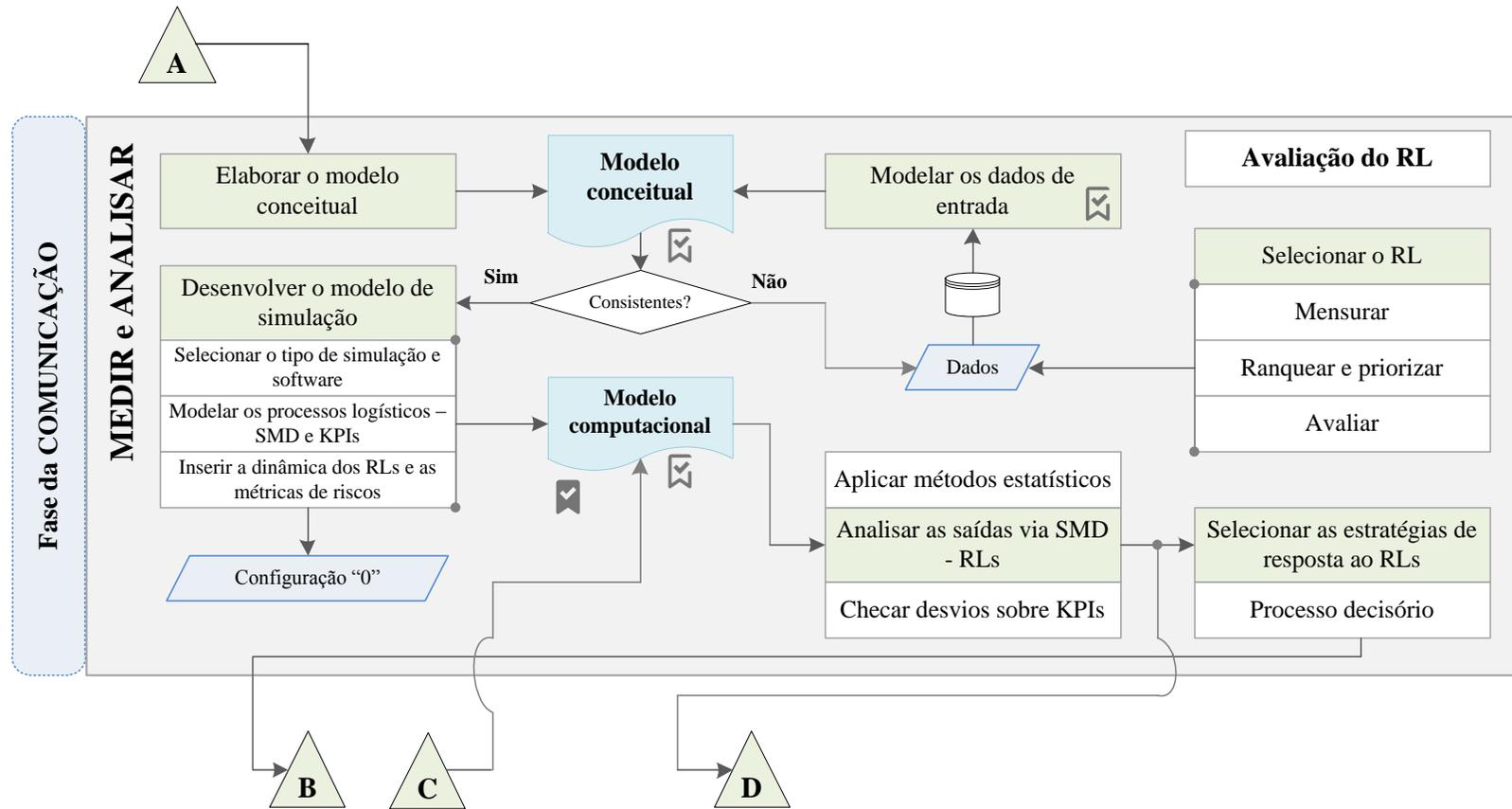
As informações obtidas na subseção anterior são sintetizadas e convertidas em um modelo conceitual baseado no perfil do RL devem considerar a natureza dos modelos de simulação e os KPIs (Figura 14). Outros aspectos são importantes, como: nível de detalhes do modelo, a relação entrada/saída gerada a partir dos KPIs e variáveis de decisão, procedimentos de coleta de dados, pressupostos, simplificações, e outros. O próximo passo é coletar os dados a partir das variáveis de decisão e KPIs. Os dados são usados para alimentar o modelo computacional e podem ser extraídos do mundo real; gerados pelo modelador por simulação randômica ou apropriados da literatura. A etapa de mensuração quantifica os riscos por meio das métricas, conforme as abordagens explicitadas no Quadro 24. As medidas de desempenho devem estar alinhadas aos KPIs. A mensuração do risco representa definir o nível de intensidade assumido pelo RL, estando o sistema logístico da CS exposto a diversos riscos.

Quadro 24 – Medidas de risco

Grupo	Medidas
Índice de Probabilidade do Risco	Probabilidade (Xie et al., 2009); Índice Rede Bayesiana (Yan; Suo, 2013); Número de Prioridade de Risco (Kengpol; Tuammee, 2015); Matriz de Risco (Handfield; McCormack, 2008); Mapa de Risco (Walters, 2007); Probabilidade vs impactos e/ou Pesos (Nooraie; Parast, 2015); Probabilidade vs tempo de duração vs impacto efetivo vs impacto (Breur et al., 2013); Probabilidade vs eficiência vs impacto vs peso (Jeong; Hong; Xie, 2014); Probabilidade acumulada vs perda (Schmitt, 2011); Probabilidade vs Variância vs Peso (Sawik, 2016); Confiabilidade x probabilidade vs impacto vs peso (Wei-hua et al., 2011); Probabilidade vs impacto vs Média-desvio-padrão (Liew; Lee, 2012); Probabilidade média, escala de risco and consequência (Chang; Xu; Song, 2015); Teoria da perspectiva (Li; Chen; Wang, 2011); Índice de exposição ao risco (Schlegel; Trent, 2015); Intensidade de risco residual (Sodhi; Tang, 2012).
Abordagem <i>Mean-Risks</i>	Função Utilidade (Chiu; Choi, 2013), Probabilidade de lucro alvo (Chiu; Choi, 2013), VaR (Lockamy III; McCormack, 2010); CVaR (Azad et al., 2014); Mean-Downside Risk (Chiu; Choi, 2013); Downside Risk (You; Wassick; Grossmann, 2009); DaR, IaR, VaDR, BaR (Sodhi e Tang, 2012), Mean-CVaR (Soleimani; Govindan, 2014); Risco Premium (Appelquist; Pekny; Reklaitis, 2000); Upside Potential Ratio (Hahn; Kuhn, 2012).
Função Risco (FR)	Custo ajustado ao risco (Olson; Wu, 2011), FR vs confiabilidade (Wang, 2013); FR – variáveis (Ritchie; Brildley, 2007), FR vs ponderação (Nagurney et al., 2005); Perda/Risco (Huang et al., 2013).
Desvio	Média-variância (Kang; Kim, 2012); Média-desvio-padrão (Scheller-Wolf; Tayur, 2009), Semidesvio do alvo e Semidesvio central (Govindan; Fattahi, 2017); Coeficiente de variação (Kouvelis et al., 2012); Desvio médio absoluto (Konno; Yamazaki, 1991), Média e desvio (Gaonkar; Viswanadham, 2007); Média-semidesvio (Govindan; Fattahi, 2017); Média-semivariância (Chiu; Choi, 2013); Variância (Hamedani; Jabalameli; Bozorgi-Amiri, 2013); Desvio padrão (Croson et al., 2014); Índice de variabilidade (You; Wassick; Grossmann, 2009).
Outros	Aversão constante ao risco absoluto (Xiao; Yang, 2008), Valor econômico agregado (Hahn; Kuhn, 2012); Índice quadratico médio de imprecisão (Wang; Hsu, 2010); Valor presente líquido - Risco (Giarola; Bezzo; Shah, 2013); Índice de ranqueamento de risco (Manuj; Esper; Stank, 2014); Índice de intensidade de controle de risco (Ma; Feng, 2013); Tempo de recuperação (Schlegel; Trent, 2015).

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 14 – Framework estendido da fase medir e analisar



Fonte: Produção do próprio autor

Após a medição dos riscos o analista deve decidir quais riscos ele vai incorporar ao modelo de simulação. Os riscos são ranqueados, ou priorizados, determinando quais serão considerados e, por conseguinte, gerenciados. Diversas ferramentas e métodos MCDM podem ser aplicados para priorizar RLs (Quadro 25 ao final desta subseção). A análise de RLs sucede a etapa de priorização dos riscos, quando o analista avalia a gravidade dos impactos e intensidade dos RLs, avaliando os danos causados e a possibilidade de aplicação de estratégias de resposta. As análises se dão geralmente por magnitudes financeiras, como custos, rentabilidade, renda e outras dimensões (duração da ruptura, falhas operacionais, excesso ou perda de capacidade).

Após a análise dos riscos o analista deve modelar os dados de entrada que serão utilizados no modelo de simulação testando a acurácia, robustez, consistência e rastreabilidade do conjunto de dados. Ferramentas estatísticas podem ser utilizadas neste procedimento de modelagem com o fim de verificar possíveis inconsistências nos dados coletados. Neste caso, o analista deve voltar para a etapa de modelagem dos dados e corrigir os problemas. Após este passo, o conjunto de dados está apto a ser usado no modelo computacional. Nesse sentido, o modelo conceitual, criado para representar a configuração dos riscos no sistema logístico da CS, pode ser convertido no modelo de simulação.

Os tipos de simulação e softwares passíveis de utilização no modelo computacional podem ser consultados no Quadro 25. As características do problema a ser resolvido pela modelagem, a complexidade e natureza do modelo conceitual orientam as decisões sobre o tipo de simulação e escolha do software. O *framework* da proposta metodológica foi desenvolvido para cumprir o ciclo OvS. Dois passos são importantes na criação do modelo computacional: a implantação dos processos logísticos e estrutura da CS; inserção dos aspectos sobre os riscos (dinâmica dos RLs, KPIs e medidas de riscos). A dinâmica de RLs se desenvolve sobre as operações desencadeadas pelo sistema logístico, suportada pelas etapas de configuração executadas na fase descrita na subseção anterior. Após a implantação do sistema logístico e da estrutura da CS procede-se à inserção da dinâmica do risco.

A dinâmica de risco deve considerar a intensidade dos riscos em termos das distribuições de probabilidades de ocorrência dos eventos e os impactos associados. Os KPIs e as métricas de riscos podem fornecer informações relevantes sobre os efeitos no sistema logístico. Os dados processados devem ser parametrizados no modelo computacional para configurar o sistema logístico, a CS e os riscos, constituindo a configuração base (0) do modelo.

A quantidade de rodadas necessárias na simulação deve ser estimada. O SMD deve refletir a dinâmica do RL na CS, produzindo as saídas necessárias para apoiar o processo decisório. Conforme padrões de desempenho estabelecidos, o analista deve comparar e analisar os KPIs/Riscos, identificando desvios e orientando o processo de tomada de decisão para mitigar os RLs que provocam maior instabilidade no sistema logístico. A análise e tomada de decisão devem ser realizadas com apoio de ferramentas estatísticas para melhorar a qualidade da informação, precisão e acurácia dos resultados.

Os passos implantados nesta fase devem ser checados através do processo de verificação e validação para evitar distorções. Diversos métodos podem ser utilizados neste procedimento (Quadro 25). As pesquisas de Balci (2012), Sokolowski e Banks (2009) e Sargent (2013) podem ser examinadas, versando sobre detalhes e procedimentos de verificação e validação.

Quadro 25 – Ferramentas para a avaliação de riscos logísticos

Atividade	Ferramentas
Modelagem conceitual	Gestão dos processos de negócios (BPM), Modelo do GSCF, SCOR®, IDEF-SIM, fluxogramas, mapofluxogramas, análises baseadas na árvore de falhas, Diagramas de blocos de confiabilidade, Redes Bayesianas, Redes de Petri, Processos Markovianos, Mapa do fluxo de valor, entre outros.
Modelagem de dados	Análises gráficas, ANOVA, testes de Hipótese, análise de <i>outlier</i> , testes de aderência (KS, Qui-Quadrado, P-Valor, Erro Quadrático Médio).
Medição do RL	Índice de probabilidade do risco, abordagem <i>Mean-Risks</i> , função risco, desvio, outras.
Priorização e Análise	Abordagem Fuzzy, ANP, AHP, Vilkor, DEMATEL, MICMAC, PROMETHEE, Análise baseada na Teoria Grey, MACBETH, programação objetivo, PAPRIKA, TOPSIS, DEA, DEX (Decision Expert), MAUT, MAGIC, ELECTRE, FMEA, FMECA, perda financeira, análise de cenários, modelos baseados em variabilidade, classificação ABC (Pareto).
Tipo de simulação	SED, simulação de sistemas dinâmicos, simulação baseada em agentes, simulação híbrida, SMC, simulação orientada a objetos, simulação distribuída, simulação e jogos, simulação numérica ou randômica, simulação estocástica, simulação contínua.
Software de simulação	Linguagens de programação (Java, Jade, Pascal, C e C++, Fortran, Visual Basic), Arena, iThink, Matlab (Simulink), ExtendSim, Simprocess, Vensim, Promodel, Planilhas, Risk Curves, RADL, Simul8, Beer Game, eM-Plant, GPSS, Netlogo, Stella, Supply Chain Guru, Witness, Aladim, APROBPCS, Artifex PN, Crystal Ball, Risk Solver, Siman, MesoSim, Simio, CPN tools, Belief Network Power Soft, Leap, MedSim, KBSP, POPIM, SigmaFlow, Processmodel, Protégé, RWISE, SCOR Model SC Game, SBELP, Symphony, Stroboscope, Taylor II, Autosched.
Verificação e Validação	Implantação e verificação modular, comparação entre modelos (conceitual-computacional), avaliação por especialistas, mudança de parâmetros e análise das variáveis de decisão, uso de <i>debugger</i> (verificador de erros), comparação das saídas do modelo computacional (dados históricos, dados reais, dados extraídos da literatura) – Métodos estatísticos (ANOVA, Teste t, intervalos de confiança, análise de regressão), gráfico de causa e efeito, validação preditiva, validação face a face, cálculos preditivos, matriz de relação causal.

Fonte: Produção do próprio autor

### 4.2.3 Gestão do risco logístico (MELHORAR)

A resposta aos efeitos dos RLs é modelada nesta fase (Figura 15). Ela deve considerar o perfil do membro da CS quanto às atitudes ao risco. Comumente o risco pode ser tratado de três maneiras: (1) diminuindo sua probabilidade de ocorrência; (2) reduzindo os impactos gerados; e (3) ambas as abordagens. Cinco estratégias genéricas podem ser utilizadas ou combinadas dependendo da criticidade do risco (NORRMAN; JANSSON, 2004): (1) evitar, ou não aceitar o RL; (2) transferir-compartilhar, que é repassar o risco ou dividir a responsabilidade para um membro da CS ou terceiros; (3) mitigar, que é minimizar o nível de intensidade do risco na relação impacto/probabilidade; (4) prevenir, que é implantar ações para evitar que um risco potencial se materialize; (5) aceitar, que é assumir o risco.

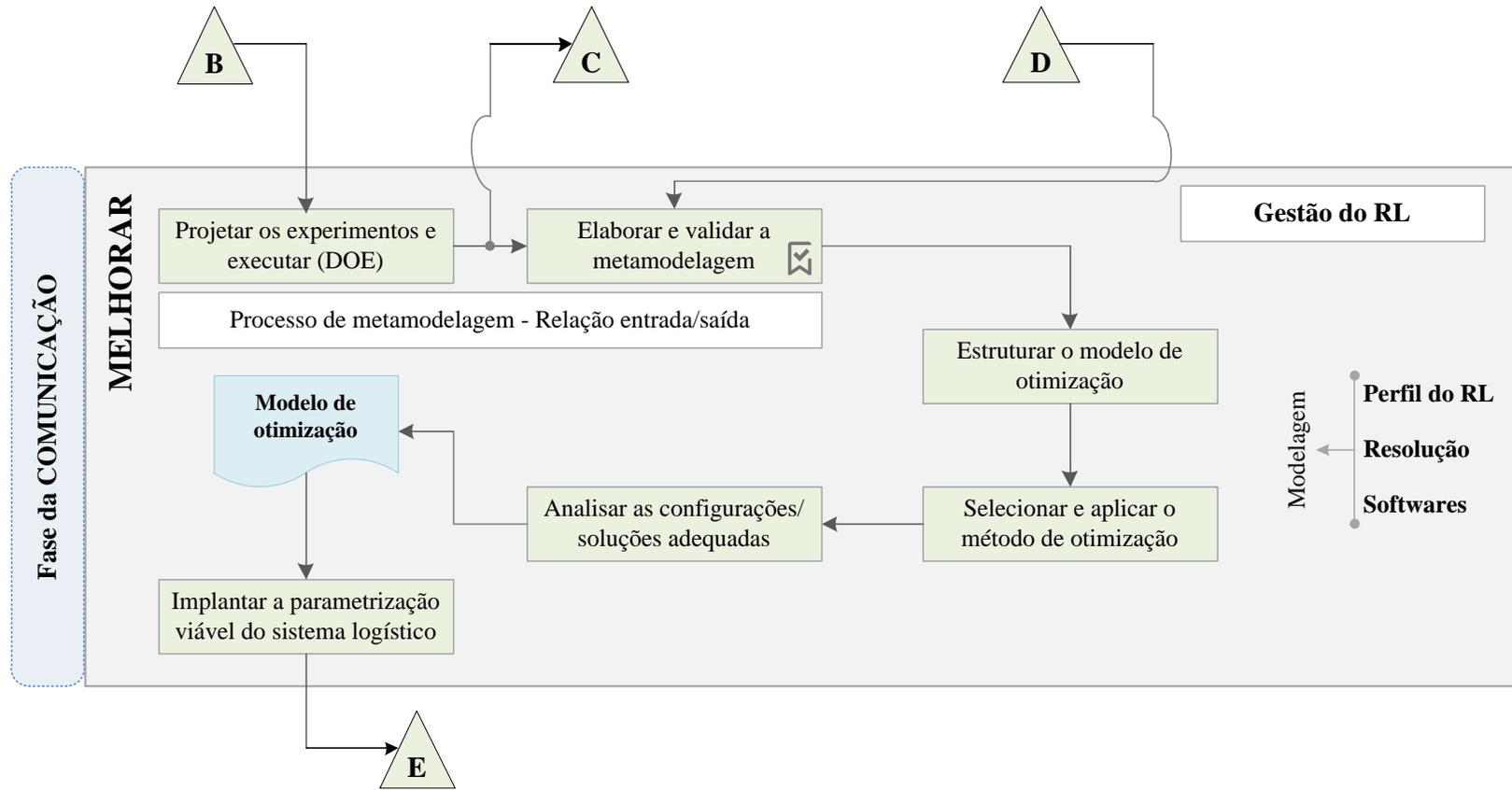
A estratégia de mitigação é bastante utilizada. As estratégias de resposta ao risco demandam diferentes soluções com custos de implantação e níveis de complexidade diversos. Buscou-se verificar estratégias que se adequassem às características do sistema logístico, como mostram os Quadros 26a e 26b, definindo-se uma nova classificação para RLs.

Quadro 26a – Estratégias de solução para riscos logísticos Parte 1

Grupo de solução	Solução	Autores
Projeto da rede logística	Otimização da rede e do sistema logístico, alocação ótima e localização de instalações e outras.	Qi, Shen e Snyder (2010); Lynch (2009); Meepetchdee e Shah (2007);
Relacionamentos e coordenação	Contratos, colaboração, alianças, terceirização, VMI, CPFR, QR, CRM, SRM e outras.	Cheng et al. (2011); Li (2012).
Demanda	Agregação, <i>pooling</i> , métodos de previsão, redução da variabilidade e outras.	Chopra e Sodhi (2004); Gan, Sethi e Yan (2004)
Capacidade	Planejamento da capacidade, expansão, terceirização, redução e outras.	Kouvelis et al. (2012).
Agilidade	Redução de <i>lead times</i> , métodos <i>lean</i> , aumento da flexibilidade e outras.	Gligor, Holcomb e Stank (2013).
Visibilidade e informação	Aumentar a visibilidade sobre estoques e demanda, compartilhamento de informações e outras.	Christopher e Peck (2004).
Treinamento de pessoas (recursos)	Capacitação dos recursos humanos que suportam as operações logísticas, treinamento e outras.	Closs, Speier e Meacham (2011).
Estoques	Posicionamento, <i>buffering</i> , <i>pooling</i> , estoque de segurança, controle e acurácia, políticas de estoque e outras.	Olson (2014); Schmitt e Snyder (2012), Walters (2007).

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 15 – Framework estendido da fase melhorar



Fonte: Produção do próprio autor

Quadro 26b – Estratégias de solução para riscos logísticos Parte 2

<b>Grupo de solução</b>	<b>Solução</b>	<b>Autores</b>
Transporte	Flexibilidade dos modais, agilidade, redução de <i>lead times</i> , <i>postponement</i> , tipos de veículos.	Choi, Narasimhan e Kim (2012); Li, Chen e Wang (2011); Manuj e Mentzer (2008a); Sokolov, Auld e Hope (2012).
Segurança e Seguros	Proteção e segurança dos ativos.	Schlegel e Trent (2015); Schmitt e Singh (2012)
<i>Business Continuity Planning</i>	Desenvolvimento dos cenários de respostas e manutenção da metodologia, planos alternativos emergenciais e de contingência.	Handfield e McKomark (2008); Norrman e Jansson (2004).
Reserva e redundância	Frotas, recursos, realocação, <i>pooling</i> , máquinas e equipamentos.	Curkovic, Scannel e Wagner (2016); Kouvelis et al. (2012); Sodhi e Tang (2012).
Terceirização logística	Fazer ou terceirizar, auditoria, avaliação de desempenho, mecanismos de recompensa e penalização.	Kaye (2008).
Tecnologia de informação	RFID, GIS, ERP, <i>Data Warehouse</i> , monitoramento em tempo real das operações.	Bichou, Bells e Evans (2007), Li, Chen e Wang (2011).
Processamento de pedidos	Otimização dos procedimentos, otimização das quantidades pedidas, redução de <i>lead times</i> .	Olson (2014)

Fonte: Produção do próprio autor

As estratégias de resposta devem ser escolhidas levando-se em consideração o efeito do RL de acordo com as saídas do modelo de simulação e as variáveis de decisão. DOE pode ser utilizado para minimizar o espaço de busca das soluções conforme as estratégias de respostas, definindo aquelas combinações que melhoram o desempenho do sistema logístico e servindo para projetar os experimentos a serem realizados pelo modelo de simulação, além de facilitar a seleção de cenários (configurações) para o sistema logístico.

Após a execução do arranjo experimental no modelo de simulação dar-se início ao processo de metamodelagem a partir do tratamento da relação I/O. Uma abordagem de metamodelagem deve ser escolhida para integrar os modelos de simulação e otimização, criando-se um modelo analítico útil à estruturação da otimização que considera as características do problema, o perfil do risco, o planejamento experimental, o objetivo de desempenho da simulação e o software a ser usado para gerar as soluções do modelo. Espera-se fornecer soluções adequadas para as variáveis de decisão que melhorem o desempenho dos parâmetros dos KPIs (função objetivo), sejam sujeitos ou não a restrições.

Os métodos de otimização devem ser escolhidos para produzir as soluções mais aceitáveis para o modelo de simulação de acordo com os cenários e as saídas geradas pelo SMD/KPIs. As abordagens vistas neste trabalho podem auxiliar na seleção dos métodos de otimização. As soluções geradas pela otimização e as configurações devem ser analisadas, decidindo-se pelas soluções mais viáveis de implantação. A melhor proposta deve representar a configuração mais adequada que de fato melhore o desempenho do sistema logístico. Após este passo, os parâmetros fornecidos pela otimização devem ser experimentados no modelo de simulação para atestar as melhorias. Os passos desta fase devem passar por procedimentos de verificação e validação, gerando-se o modelo de otimização devidamente verificado e validado, conforme técnicas do Quadro 25.

Com o modelo de otimização apto à implantação da parametrização ótima, alguns aspectos devem ser considerados, por exemplo, a responsabilidade dos membros que deverão aplicar a estratégia de resposta. O tomador de decisão deverá avaliar aspectos como: o nível decisório exigido pelas ações de implantação, recursos e custos envolvidos, cronograma de execução, educação e treinamento de pessoas, procedimentos de execução, socialização de informações, entre outros. Esses e outros aspectos devem estar incluídos em um plano de ação de resposta ao risco, detalhando todos os procedimentos aos envolvidos na implantação.

Após o período de implantação das ações propostas, novos dados do SMD - KPIs devem ser estatisticamente processados e analisados para validar a solução executada avaliando se houve melhoria no desempenho das variáveis de decisão. Em caso de insucesso do plano de ação, recomenda-se verificar os possíveis problemas, identificando suas causas raízes, corrigindo e checando novamente os resultados por meio do SMD - KPIs. Em último caso, projeta-se uma nova solução para o problema. O Quadro 27 ilustra ferramentas e metodologias que podem ser utilizados esta fase.

Quadro 27 – Ferramentas para a gestão de riscos logísticos

Atividade	Ferramentas
Projeto de experimentos	Arranjos fatoriais completos e fracionados, Taguchi, Superfície de Resposta.
Metamodelagem	Regressão linear simples e múltipla, metodologia de superfície de resposta, modelo Kriging, algoritmos genéticos, redes neurais, funções de base radial, regressão multivariada adaptativa <i>spline</i> , regressão do vetor de suporte, otimização robusta.
Métodos de otimização	Abordagem heurística, modelagem algébrica, modelagem multicritério, modelos de rede, otimização multiobjetivo, programação dinâmica, programação estocástica, programação geométrica, programação inteira, programação linear, programação não linear, programação quadrática, Teoria dos jogos e condições de equilíbrio, modelos MILP e MINLP, Métodos evolucionários, GRG, entre outros.
Softwares para otimização	CPLEX-GAMS, Matlab, Fortran, Java, Planilhas (Solver), Lindo, Lingo, Gurobi, Dash Optimization's Xpress-MP, Mathcad, IMSL C Numerical Library, e outros.

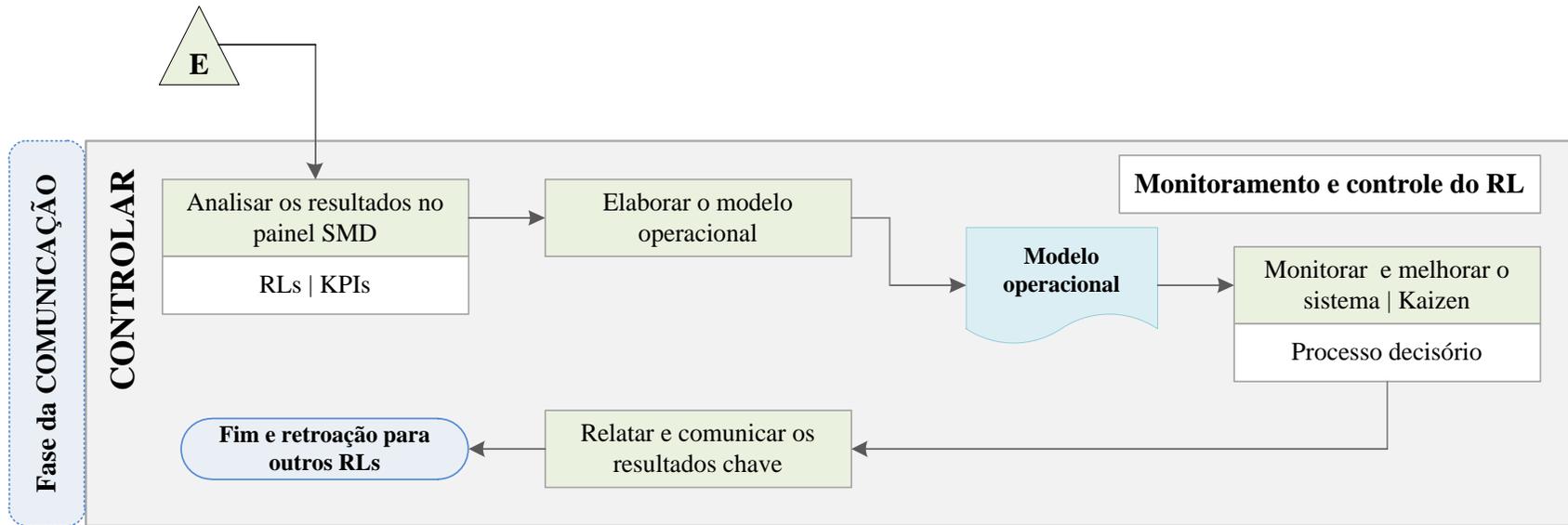
Fonte: Produção do próprio autor

#### 4.2.4 Monitoramento do risco logístico (CONTROLAR)

Conforme Figura 16, O SMD deve ser avaliado segundo seus KPIs para verificar se a estratégia de resposta ao RL e a solução gerada na otimização foram adequadas. A ação subsequente à validação do modelo de otimização e sua implantação visam validar o modelo operacional, base para o processo de tomada de decisão. O modelo operacional inclui os parâmetros ótimos das variáveis de decisão, procedimentos de validação e confirmação das ações e os novos padrões de desempenho do modelo e pode ser aplicado como um *benchmarking* para novas melhorias no sistema logístico da CS. Os métodos de validação vistos no Quadro 25 podem ser utilizados para testar e ratificar os resultados do modelo operacional, creditando o modelo operacional como importante instrumento de apoio gerencial.

As atividades de monitoramento, controle e comunicação são sistemáticas e contínuas para todas as fases. Os procedimentos de supervisão, monitoramento, auditoria e melhoria contínua (*Kaizen*) devem ser estabelecidos para combater RLs e manter planos de ação. O desempenho do sistema logístico pode ser acompanhado, por exemplo, por sistemas integrados de gestão, sistemas computacionais, relatórios, questionários, sistemas de medição, visitas, ações de *benchmarking*, tecnologias para monitoramento do risco, entre outras. O acompanhamento do RL em tempo real ou mesmo o estabelecimento de mecanismos para detectá-lo previamente são atitudes que podem evitar maiores danos ao desempenho global da CS. A comunicação exerce papel importante, pois as informações devem ser disseminadas por todos os membros envolvidos com o sistema logístico, encorajando os times na manutenção da metodologia e tornando as operações logísticas na CS mais robustas e menos vulneráveis aos riscos.

Figura 16 – *Framework* estendido da fase controlar



Fonte: Produção do próprio autor

### 4.3 Limitações da sistemática proposta

A proposta para gerenciar RLs em CSs é sustentada pelos métodos de simulação e otimização. A reprodução do comportamento do sistema logístico e mitigação dos riscos são realizadas por meio desses dois métodos, não se valendo de outras abordagens. A nova abordagem foi desenvolvida para atender aos objetivos de PSL's, sendo mais apropriada para avaliar o desempenho logístico realizado por tais *players* da cadeia, focando na organização e operação do sistema logístico. Apesar das críticas sobre a falta de flexibilidade do modelo SCOR<sup>®</sup>, a nova sistemática para gestão de RLs se apoia no conjunto de indicadores de desempenho e nos processos de negócio do SCOR<sup>®</sup>, embora outras abordagens pudessem ser utilizadas em substituição.

A abordagem proposta nesta tese para RLs é focada na estratégia de mitigação dos riscos para minimizar a intensidade dos RLs. As demais estratégias poderiam ser aplicadas e testadas. Entretanto, nesta proposta a mitigação é a base para o tratamento dos RLs em CSs. Embora os modelos de simulação possam ser executados em tempo real, uma das limitações apresentadas é a atualização *online* dos dados sobre RLs. Contudo, a IoT pode ser alternativa para integrar a detecção precoce dos RLs e o armazenamento de dados aos mecanismos que alimentam o modelo de simulação com parâmetros e outros elementos.

O modelo de simulação não foi validado a partir da técnica que compara os resultados do sistema real e suas saídas. Não se utilizou de pesquisas de campo para levantar dados sobre o sistema simulado, mas sim houve a elaboração de um modelo híbrido montado a partir de um modelo real, devidamente validado (CARVALHO et al, 2012). Essa sistemática metodológica considera apenas RLs em detrimento a outros riscos que podem incidir sobre o desempenho da CS, sendo recomendada para PSL's. Há de se ter prudência e atenção no processo de metamodelagem, pois o metamodelo é uma simplificação de um modelo que já foi abstraído. Apenas o ciclo OvS foi explorado nesta proposta para avaliar os efeitos do RL, otimizar parâmetros e testar a eficácia e eficiência de uma nova configuração sobre o desempenho do sistema logístico da CS estudada, ficando o ciclo SvO como opção para estudos futuros.

#### **4.4 Escopo, extensão e profundidade do modelo de gestão**

O escopo de aplicação da metodologia está situado nos limites que permeiam as operações do sistema logístico em CSs sob a influência de riscos de mesma natureza, os chamados RLs. É notório que vários operadores logísticos podem operar na CS. A empresa líder deve promover a padronização e o alinhamento entre as metodologias e SMD's para permitir a comparação global dos resultados entre os PSL's atuantes nos diferentes elos da cadeia.

Quanto à extensão, a sistemática desenvolvida é flexível e permite que seja implantada em todos os elos da cadeia, a jusante, montante e abrangendo a empresa focal. Pode ser aplicada nas camadas diretas ou na cadeia estendida. Se for do interesse de todos os membros da CS, a depender da densidade da malha, todos os elos e níveis do arranjo podem ser envolvidos neste processo de gestão de RLs. Processos logísticos ou processos de negócios da CS podem ser incluídos na modelagem, reforçando a flexibilidade promovida pela nova metodologia.

A base de conteúdo que sustenta essa proposta indica o quão profundo pode ser o tratamento e gestão do RL em CSs. A classificação para RLs permite que diversos tipos de riscos possam ser modelados; inúmeras métricas de riscos possam ser utilizadas conforme objetivos do estudo; várias estratégias de resposta ao risco e soluções podem ser consideradas no teste de alternativas de soluções; inclusão de mais de um PSL; customização dos SMD's conforme os objetivos dos membros da CS e do perfil do RL. Em suma, a sistemática proposta pode ser customizada, permitindo maior abrangência e profundidade em aspectos de interesse da CS frente aos RLs que se apresentam, já que ela é uma proposta genérica para PSLs.

#### **4.5 Contribuições científicas da pesquisa**

Uma das relevantes contrapartidas apresentadas é o desenvolvimento de uma nova sistemática metodológica para melhorar a gestão de RLs em CSs a partir das potencialidades dos métodos de simulação e otimização, podendo propiciar aos gestores de PSLs bases adequadas para projetar sistemas logísticos sob a influência de RLs. Problemas como rupturas dos fluxos físicos de materiais/bens acabados, atrasos em entregas, entre outros, podem ter impactos minimizados a partir do uso sistemático da proposta.

Portanto, uma das contribuições é combinar riscos em CSs, operações logísticas e modelagens baseadas em métodos de simulação e otimização em uma única perspectiva de gestão. A nova abordagem permitirá testar, analisar e otimizar vários cenários para definir configurações mais adequadas do sistema logístico para alavancar o desempenho global da CSs face os riscos. Esta tese apresenta um guia passo a passo de implantação das fases detalhando como operacionalizar as etapas para aperfeiçoar a gestão de RLs.

Poucos trabalhos na literatura exploram o ciclo OvS para aproveitar as relevantes vantagens da integração desses métodos como ferramentas de mitigação dos riscos em CSs, em especial focados na simulação visual das operações logísticas e inserção da dinâmica de riscos na CS. Esta pesquisa contribui para preencher estas duas necessidades. Ou seja, melhorar a aplicação dos fundamentos dos métodos de simulação e otimização como mecanismos de mitigação de riscos associados às estratégias de resposta; e proporcionar a compreensão da dinâmica dos riscos e impactos a partir da animação como ferramenta de suporte no modelo de simulação.

Outra contribuição desta tese é o desenvolvimento de um SMD adaptado do modelo SCOR<sup>®</sup> e alinhado com KPIs e métricas de riscos, possibilitando a integração sistemática da modelagem dos RLs aos modelos de simulação e otimização. Esta pesquisa contribui para a evolução do estado da arte sobre RLs em CSs, enquanto sistemática desenvolvida para tratar tais riscos e minimizar impactos decorrentes.

## **4.6 Conclusões do capítulo**

O capítulo teve por objetivo detalhar aspectos sobre a sistemática proposta. Inicialmente dois *frameworks* da abordagem foram apresentados: um *framework* simplificado e outro estendido. Como resultados das pesquisas, um *framework* para mapeamento e arquitetura da cadeia foi proposto. Esta contribuição propicia modelar CSs conforme suas características e estrutura. Outra proposta oferecida foi um *framework* para relacionar a arquitetura da CS, o perfil do RL e o desenvolvimento de um SMD que seja customizado de acordo com a incidência dos riscos relacionando KPIs aptos a capturar os efeitos provocados por desordens no sistema logístico. Uma classificação para RLs foi elaborada, uma vez que a maioria das abordagens é focada no contexto de CSs. Assim, a categorização dos RLs é realizada conforme onze grupos, aos quais os riscos podem ser classificados e identificados.

Uma densa revisão sobre a categorização de medidas de riscos foi realizada, oferecendo ao analista uma gama de opções segundo os objetivos da modelagem. Um quadro referencial de estratégias de resposta ao risco na forma de soluções foi estabelecido por meio da revisão de literatura, relacionando estes mecanismos de resposta aos RLs. Ao final das subseções que detalharam as fases da proposta de gestão de RLs, diversos quadros enumeraram ferramentas e abordagens que podem ser utilizadas para lidar com riscos em cada fase. Algumas limitações foram discutidas, tais como: o uso dos modelos de simulação e otimização. A última seção discutiu questões sobre a flexibilidade na utilização da proposta.

## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

Este capítulo na seção 5.1 aborda aspectos como a configuração da CS e do sistema logístico, bem como o risco de *stockout* e os indicadores do SMD. Já a seção 5.2 apresenta os modelos conceitual e computacional, incluindo a modelagem dos dados de entrada, os procedimentos de verificação e validação, a análise dos *outputs* e a escolha das estratégias de resposta. Na seção 5.3 as ações de mitigação são desenvolvidas a partir do projeto e análise de cenários, do metamodelo de simulação e do modelo de otimização, resultando na melhor parametrização do sistema logístico. Por fim, a seção 5.4 ilustra como o risco foi monitorado.

### 5.1 Identificação do risco logístico (DEFINIR)

A partir das características da CS exploradas no artigo de Carvalho et al. (2012) foi definido o seguinte problema da modelagem e simulação: **que configuração do sistema de operações melhora o desempenho de uma CS automotiva sob influência de riscos logísticos?** Assim, decidiu-se como objetivo **balancear os recursos do sistema logístico** dessa CS de forma a equilibrar os custos e os riscos logísticos neste arranjo. Ou seja, melhorar o desempenho e a eficiência das operações logísticas.

A natureza do modelo de simulação foi considerada como híbrida, já que o modelo construído neste trabalho de tese foi baseado em um estudo de caso real, como observado em Carvalho et al. (2012). Entretanto, um modelo híbrido axiomático normativo apoiado em dados reais foi elaborado para testar a proposta de gestão de RLs. A próxima etapa trata da modelagem do RL nessa CS, inicialmente configurada de acordo com o *framework* ilustrado na Figura 12. Os Quadros 28a e 28b ilustram os principais aspectos do mapeamento, baseados no trabalho de Carvalho et al. (2012).

Quadro 28a – Configuração e escopo da cadeia automotiva portuguesa Parte 1

Aspecto	Configuração
Empresa focal e membros	A empresa focal é a montadora instalada em Portugal. Cinco dos 670 fornecedores (S – <i>Suppliers</i> ) foram selecionados: S2.2, S2.1, S1.1, S1.3 e S1.3 (terceirizado).
Objetivos de desempenho	Custo (custos logísticos), confiabilidade e responsividade.
Amplitude	Os pontos de origem tem início nos fornecedores S2.2 e S2.1 se estendendo à jusante aos fornecedores S1.1, S1.2 e S1.3, terminando na montadora (empresa focal). Pela qualidade dos processos executados na CS, não há processos reversos.
Camadas	Para o recorte desta pesquisa foram delineadas três camadas ou elos: camada 2 (S 2.1 e S2.2), camada 1 (S1.1, S1.2 e S1.3) e camada 0 (montadora). A cadeia é estendida a montante da montadora até o elo 2, compreendendo fornecedores e empresa focal.
Relações do processo ( <i>links</i> )	A montadora mantém <i>links</i> gerenciados com os fornecedores diretos (S1.1 e S1.3). Os <i>links</i> com os fornecedores S2.1 e S2.2 podem ser considerados monitorados, enquanto que a montadora não se relaciona diretamente (não gerenciado) com o fornecedor terceirizado.
Coordenação	A empresa focal (montadora) mantém um programa de desenvolvimento de fornecedores, incluindo os já mencionados e mantendo uma relação de parceria e integração. A CS é descentralizada. Todavia, a gestão do arranjo é realizada pela montadora usando a estratégia de <i>clusters</i> , cujos fornecedores estão localizados na mesma região geográfica da empresa.
Membros chave	Membros primários (montadora, S1.1 e S1.3) e secundários (S1.2, S2.1 e S2.2).
Integração	A cadeia é horizontalizada com baixa integração vertical a montante da montadora e com processos terceirizados.
Desempenho	O sistema métrico do modelo SCOR <sup>®</sup> foi utilizado para adaptar as medidas de desempenho aos objetivos da modelagem e simulação focados no sistema logístico.
Flexibilidade	Os processos logísticos e processos de negócios desempenhados pelos membros são orientados por uma estratégia enxuta, cujos inventários são gerenciados pela política - revisão periódica.
Sistema de informação	Não se obteve informação suficiente para modelar o sistema de informação. Sabe-se que o fluxo de informação do pedido segue a política de revisão periódica e princípios enxutos.
Perfil do suprimento	Apenas um membro não gerenciado executa terceirização. Os demais fornecedores operam no regime fornecimento interno, não sendo observadas operações de suprimento global.
Recursos	As operações de produção, suprimentos, distribuição e movimentação estão apoiadas por recursos com capacidades, limitadas cujo funcionamento se baseia no tempo.
Fluxos	Os fluxos observados nesta CS são: fluxos de materiais e componentes, fluxos de produtos acabados, fluxo de informação (pedidos), fluxo de distribuição e fluxo financeiro (custos).
Perfil do produto	Os fornecedores diretos (S1.1 e S1.3) entregam conjuntos para a montadora. A CS opera com 10 produtos para este subconjunto segundo a sua árvore de materiais, no entanto, considerando que os materiais/componentes entram e saem do estoque das empresas a partir do processo de transformação, o <i>mix</i> foi ampliado para 18 produtos. Os produtos foram classificados como funcionais, neste caso veículos.
Competências	Segundo o recorte estabelecido conforme relacionamentos da CS, a montadora vincula seus processos com os fornecedores diretos (S1.1 e S1.3) por competências distintas, seus fornecedores de segunda camada por competências essenciais e o fornecedor terceirizado por competências básicas (neutras).
Tomada de decisão	Como se observou, a montadora domina a governança da cadeia, tendo relações gerenciais mais próximas com seus fornecedores de primeira camada.

Fonte: Produção do próprio autor

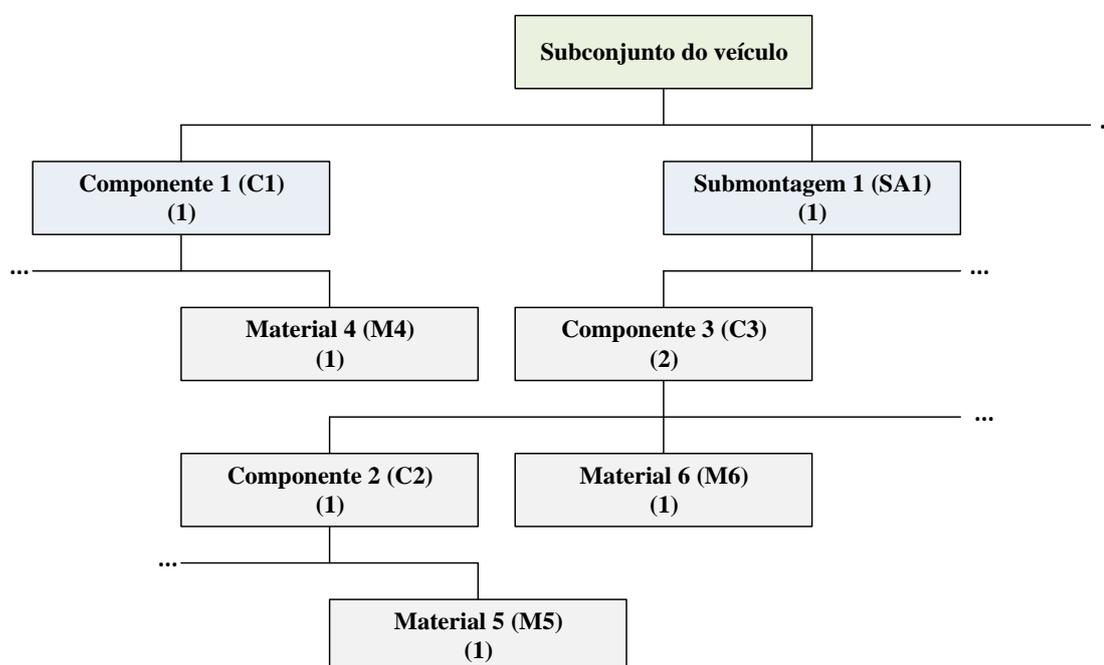
Quadro 28b – Configuração e escopo da cadeia automotiva portuguesa Parte 2

Aspecto	Configuração
Processos na CS	A abordagem de processos da CS é baseada no modelo SCOR®. Neste estudo a montadora e membros não fizeram uso de todos os processos, compreendendo o <i>PLAN</i> (Planejamento), <i>MAKE</i> (Produção), <i>DELIVER</i> (Distribuição) e <i>SOURCE</i> (Suprimentos), não sendo usados os processos <i>ENABLE</i> (apoio à gestão) e <i>RETURN</i> (retorno).
Fornecimento	Segundo as orientações e diretrizes da montadora não há fornecedores extras. Ou seja, a cadeia opera seu fornecimento em <i>single-sourcing</i> (único fornecedor para o item).
Período	A CS em análise, considerando o período a ser simulado, funciona em multiperíodo. Ou seja, vários períodos foram utilizados para obter inferências sobre o funcionamento do arranjo.
Canais de distribuição	Apesar de não mencionados explicitamente, os canais de distribuição são do tipo <i>single</i> . Ou seja, apenas um canal é utilizado para o escoamento da produção, já que os membros da cadeia estão geograficamente próximos uns dos outros.
Capacidade	Múltiplas capacidades foram identificadas associadas à produção, embalagem, transporte, movimentação e operações de suprimento.

Fonte: Produção do próprio autor

Sobre o perfil dos produtos, o artigo de Carvalho et al. (2012) fornece a árvore de material, como se observa na Figura 17, ilustrando o tipo e a quantidade de unidades por material.

Figura 17 – Árvore de material da submontagem do veículo



Fonte: Carvalho et al. (2012)

Conforme mostra a Figura 17, a árvore mostra a relação de dependência entre componentes para se produzir o subconjunto do veículo. Por exemplo, o componente C2 necessita de M5. O componente C3 precisa de um componente C2 e um material M6 para ser produzido.

O próximo passo foi configurar o sistema logístico da CS para extrair dados que permitissem a construção dos modelos conceitual e computacional. O Quadro 29 esboça os principais aspectos desse sistema.

Quadro 29 – Configuração do sistema logístico

Aspecto	Configuração
Processos e tópicos	Processamento/preenchimento do pedido (demanda), gestão de estoques, movimentação de materiais/componentes e produtos acabados, armazenagem, separação de pedidos, gestão de transportes.
Rede logística	O principal modal utilizado pelos fornecedores é o rodoviário, cuja rede interliga os cinco fornecedores da montadora que estão localizados em uma zona geográfica próxima. Ou seja, é a rede física que foi ilustrada no artigo dos autores.
Recursos e capacidades	Nesta CS os principais recursos e capacidades são os caminhões, armazéns e equipamentos de movimentação associados às suas respectivas capacidades.
SIL	O sistema de informação logística obtém as informações dos níveis de estoque e sugerem a ordenação das atividades logísticas caso haja disponibilidade de inventário, tanto para itens acabados, como para materiais e componentes. Além dessas informações, <i>inputs</i> sobre os custos logísticos e <i>lead times</i> estão disponíveis para posterior mensuração.
Estratégias de gestão	Suprimento e distribuição <i>Lean/Just-in-Time</i> , ambiente zero estoque (estoque mínimo), baixo custo e confiabilidade na entrega.
Relações estratégicas	Para este aspecto não se tem informação sobre a participação de provedores de serviços logísticos nesta CS. Infere-se pelos dados da publicação, que cada fornecedor é responsável pelo transporte e custos relacionados.
Estratégia de distribuição	A distribuição é realizada pelo sistema <i>Milk-Run</i> entre os fornecedores S1.1 e S1.3. Para os demais casos, a distribuição é dedicada rota a rota entre o fornecedor e seu cliente.

Fonte: Produção do próprio autor

Considerando o perfil do sistema logístico e a caracterização da CS, algumas decisões sobre o sistema logístico foram levantadas, representando variáveis que poderiam influenciar o seu desempenho, conforme mostra o Quadro 30.

Quadro 30 – Decisões logísticas

Decisões	Variáveis potenciais
Transportes	Dimensionamento da frota, quantidade transportada, capacidade da frota e dos recursos, frequência de entregas, estratégia de distribuição.
Estoques	Níveis de estoques, políticas de controle, ponto de reposição, <i>lead times</i> , disponibilidade, estoque de segurança, quantidades de estoques (máximas e pedidas).
Processamento do pedido	Quantidade pedida, intervalos entre (frequência) pedidos, <i>lead times</i> de processo, demanda da montadora.
Armazenagem	Capacidades dos armazéns.
Movimentação	Capacidade, número de recursos (equipamento/veículos), <i>lead times</i> de movimentação.
Custos logísticos	Custos de manutenção de estoque, custos de transporte, custos de movimentação.

Fonte: Produção do próprio autor

A próxima etapa aborda a modelagem do RL. O primeiro passo foi levantar e classificar os possíveis riscos no sistema logístico, conforme informações descritas nos Quadros 29 e 30.

RLs relacionados ao desempenho operacional, tais como: riscos de transportes, estoques e capacidade logística foram selecionados para simular os efeitos na CS a partir da inserção de perturbações no modelo de simulação.

Eventos potencialmente geradores de RLs estão ligados às falhas na estrutura operacional, inadequado dimensionamento da frota, programação de distribuição, projeção de parâmetros para a gestão de estoques, entre outros. Os impactos foram mensurados em termos de custos logísticos, relacionando a ocorrência e suas consequências financeiras. A fonte e escopo do RL foram delimitados para os elos da cadeia, checando-se a origem dos riscos, mapeando e mensurando aqueles de maior impacto para a cadeia. As atitudes ao risco não foram incluídas, uma vez que não foi possível obter informação sobre o perfil do membro. Considerou-se que cada membro no seu elo é responsável pelo risco produzido e pela adoção das medidas de mitigação necessárias à redução dos efeitos.

Uma análise cruzada entre indicadores para a CS e métricas para o sistema logístico foi feita buscando-se determinar a abordagem de medição do risco conforme arquitetura da CS e perfil do RL. Assim, a métrica do custo logístico foi determinada conforme Equação 2:

$$CLT_{(k,t)} = \sum_{j=1}^{jkt} [C Trans_{(k,t)j} + C Mov MP_{(k,t)j} + C Mov PA_{(k,t)j} + C Mov IN_{(k,t)j} + C Man_{(k,t)j} + C Stock IT_{(k,t)j} + C Stock TP_{(k,t)j}] \quad (2)$$

Onde:

C Trans  $(k,t)$ : custo de transporte (baseado no lead time de transporte)

C Mov MP  $(k,t)$ : custo de movimentação de matéria-prima e componentes

C Mov PA  $(k,t)$ : custo de movimentação de produto acabado

C Mov IN  $(k,t)$ : custo de movimentação dos insumos no setor de suprimentos

C Man  $(k,t)$ : custo de manutenção de inventário

C Stock IT  $(k,t)$ : custo do *stockout* (indisponibilidade do item) por item faltante

C Stock TP  $(k,t)$ : custo do *stockout* por duração de tempo

Pedido “j” feito pela entidade “k” no período de tempo “t”

Os custos de transporte, movimentação e *stockout* foram definidos em função de *lead times* e volumes dos itens movimentados. O *stockout* representa a ruptura no fluxo físico de material, componentes e/ou produtos acabados. O custo de *stockout* por item foi obtido multiplicando-se a quantidade de itens em *backlog* (pedidos não atendidos) por um valor arbitrário de uma unidade não atendida. No custo de *stockout* por duração, o valor total foi obtido a partir do registro de tempos (duração), cujos itens ficaram em *backlog* versus um valor/hora arbitrário. O custo de manutenção de estoque foi calculado pelas quantidades mantidas, multiplicadas pelos valores de custos correspondentes. Os valores foram atribuídos para sinalizar impactos causados pela indisponibilidade do item.

A medida de risco utilizada no modelo de simulação foi a abordagem clássica, associando a probabilidade de ocorrência do risco logístico e o impacto do custo relacionado, conforme formulação da Equação 3:

$$RS_{(k,t)} = \sum_{j=1}^{Jkt} \left[ \left( \frac{TM\ stock}{TTS} \right) \times C\ Stock_{(k,t)j} \right] \quad (3)$$

Onde:

RS  $(k,t)$ : Risco de *stockout* medido em unidades financeiras (custos)

TM Stock  $(k,t)$ : Tempo médio em regime de *stockout* em horas

TTS  $(k,t)$ : Tempo total do período de simulação (horas/dias)

C Stock  $(k,t)$ : Custo do *stockout* por hora

Pedido “j” feito pela entidade “k” no período de tempo “t”

Portanto, as variáveis de resposta ou indicadores de desempenho são o custo logístico total e o risco de *stockout* (risco de ruptura). As métricas estão em um SMD, possibilitando avaliar o desempenho por membro da cadeia.

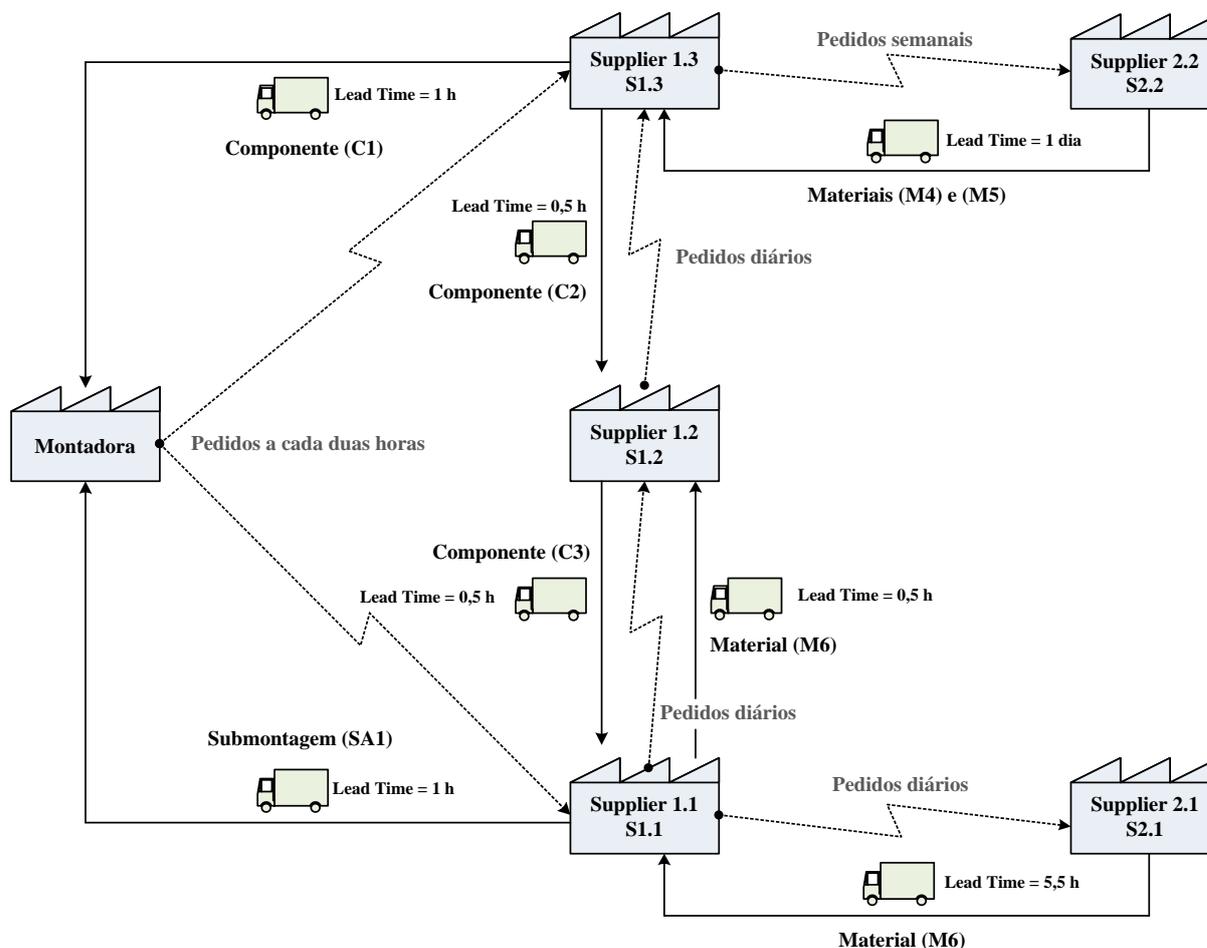
## 5.2 Avaliação do risco logístico (MEDIR E ANALISAR)

Esta etapa ilustra os resultados obtidos a partir da construção do modelo de simulação e da avaliação do SMD e suas respectivas métricas, como descritos nas seções subsequentes.

### 5.2.1 Modelagem conceitual

A Figura 18 ilustra a dinâmica da cadeia e das operações logísticas e os respectivos fluxos físicos e de informação. A montadora envia, a cada duas horas, pedidos do componente C1 e submontagem SA1 aos *Suppliers* S1.3 e S1.1. Esses insumos são entregues à montadora em um *lead time* de 1 hora. As setas intermitentes representam fluxos de pedidos (informação) e as contínuas o fluxo físico de distribuição. Semanalmente o *Supplier* 1.3 pede os materiais M4 e M5 ao *Supplier* S2.2, com *lead time* de entrega de 1 dia. O *Supplier* S1.1 pede material M6 ao *Supplier* 2.1, com tempo de entrega de 5,5 h. Esse material é enviado ao *Supplier* 1.2, que o junta com o componente C2 para produzir o componente C3, enviando ao *Supplier* 1.1. Os materiais M4 e M5 são processados pelo *Supplier* 1.3 para produzir o componente C2, que por sua vez é entregue ao *Supplier* 1.2. Os pedidos entre os *Suppliers* 1.1, 1.2 e 1,3 são feitos diariamente, bem como entre o *Supplier* S1.1 e S2.1.

Figura 18 – A cadeia de suprimentos analisada

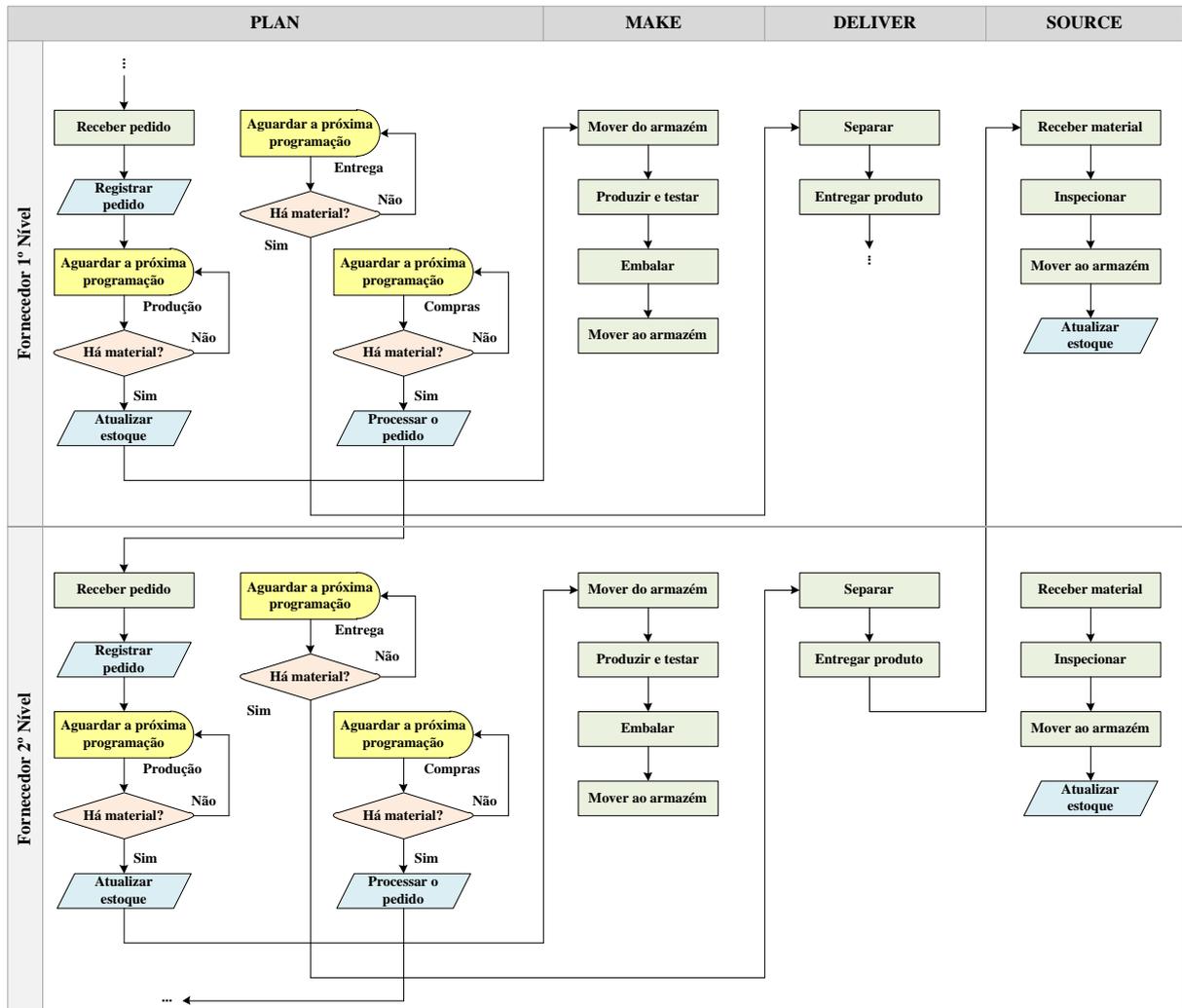


Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2012)

Segundo levantamentos de Carvalho et al. (2012) junto aos gerentes de operações e logística, existem processos comuns que se alinham aqueles definidos pelo modelo SCOR<sup>®</sup>, exceto os processos de retorno (logística reversa) e suporte à gestão (*Enable*). Os processos SCOR<sup>®</sup> são executados para transformar ou transportar materiais e/ou produtos.

Conforme Figura 19, a intersecção entre dois processos representa um *link* (nó) na CS. Assim, o recebimento das ordens, produção, entrega e suprimentos são comuns aos membros, como mostra o diagrama de fluxo dos processos e das atividades segundo bases do modelo SCOR<sup>®</sup>. Essa representação gráfica fornece subsídios relevantes que foram utilizados para desenvolver a modelagem conceitual. O diagrama apresenta várias mecânicas de acordo com os processos do modelo SCOR<sup>®</sup>. O uso dessa ferramenta facilitou bastante a compreensão de como operam as atividades entre os membros da CS e sua interface com o sistema logístico.

Figura 19 – Diagrama de fluxo dos processos SCOR®

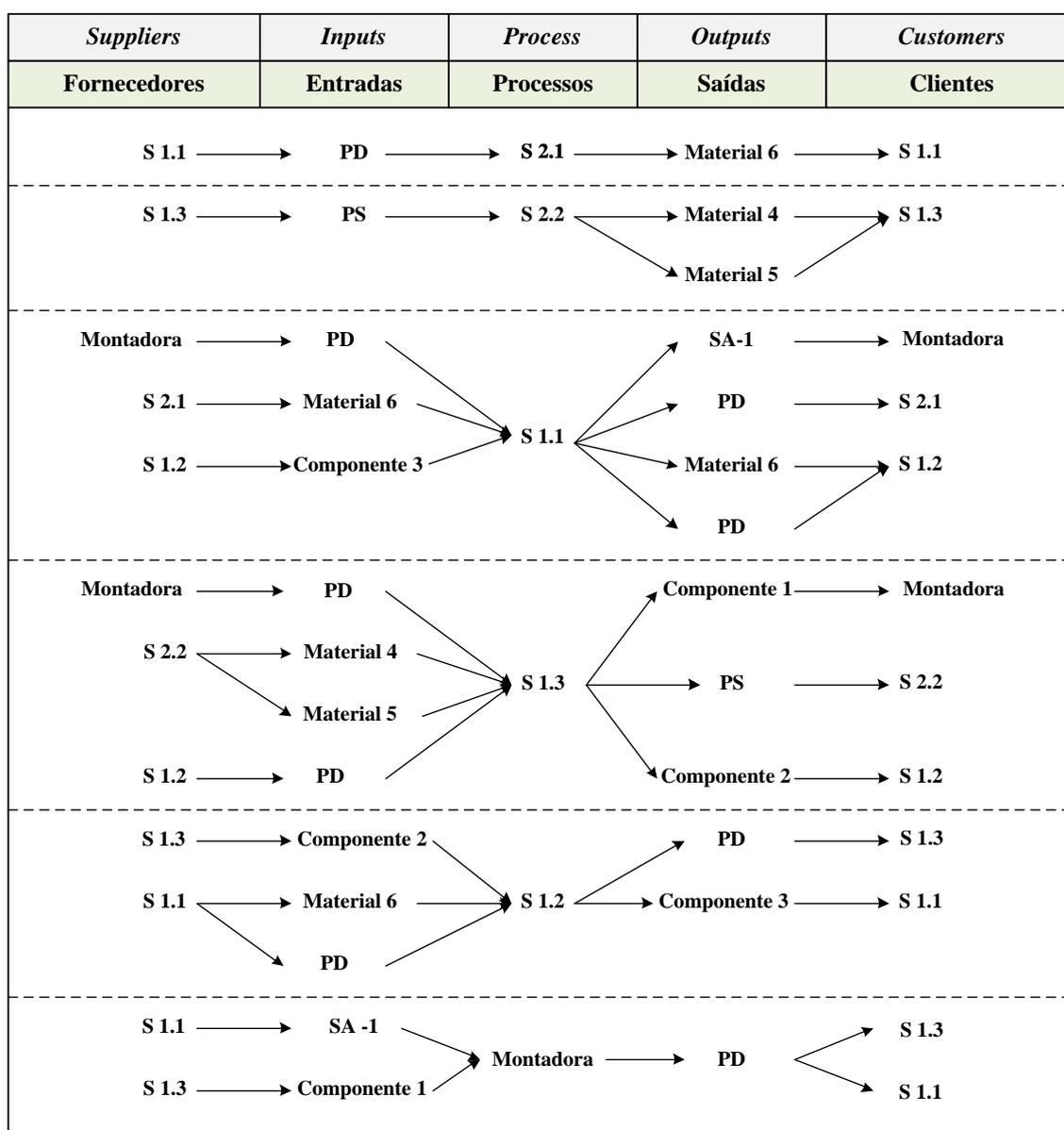


Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2012)

A Figura 19 ilustra na horizontal os processos SCOR®, da esquerda para a direita, *PLAN*, que é o planejamento; *MAKE*, produção; *DELIVER*, distribuição e *SOURCE*, fornecimento. Já na vertical, a figura mostra os membros da CS. No planejamento há três mecânicas a considerar: entrada de pedidos para a produção, programação da distribuição e programação de compras. Na produção está a mecânica responsável pela montagem e/ou manufatura. Na distribuição está a mecânica de separação e transporte dos componentes. Por fim, nos suprimentos está a mecânica de recebimento e armazenagem dos insumos (materiais/componentes). Todas essas mecânicas são encadeadas membro a membro da cadeia.

Outra ferramenta foi usada para melhor compreender as relações entre entradas, processos e saídas nas trocas dos processos de negócios, notadamente processos SCOR®, realizados entre os membros. Nesse sentido, empregou-se o SIPOC; S (*Supplier*), I (*Inputs*), P (*Process*), O (*Outputs*), C (*Customers*), em ordem: fornecedores, entradas, processos, saídas e clientes. Essa ferramenta de mapeamento fornece uma visão estruturada e sistêmica sobre o processo em análise, como mostra a Figura 20, sendo utilizada para facilitar a modelagem conceitual a partir das relações estabelecidas na Figura 18, melhorando a compreensão da dinâmica dessa CS, com o objetivo de evitar possíveis distorções de interpretação.

Figura 20 – SIPOC do macroprocesso da cadeia de suprimentos em estudo



Notações: S (Supplier); PD (Pedidos diários); PS (Pedidos semanais); SA1 (Submontagem 1)

Fonte: Produção do próprio autor

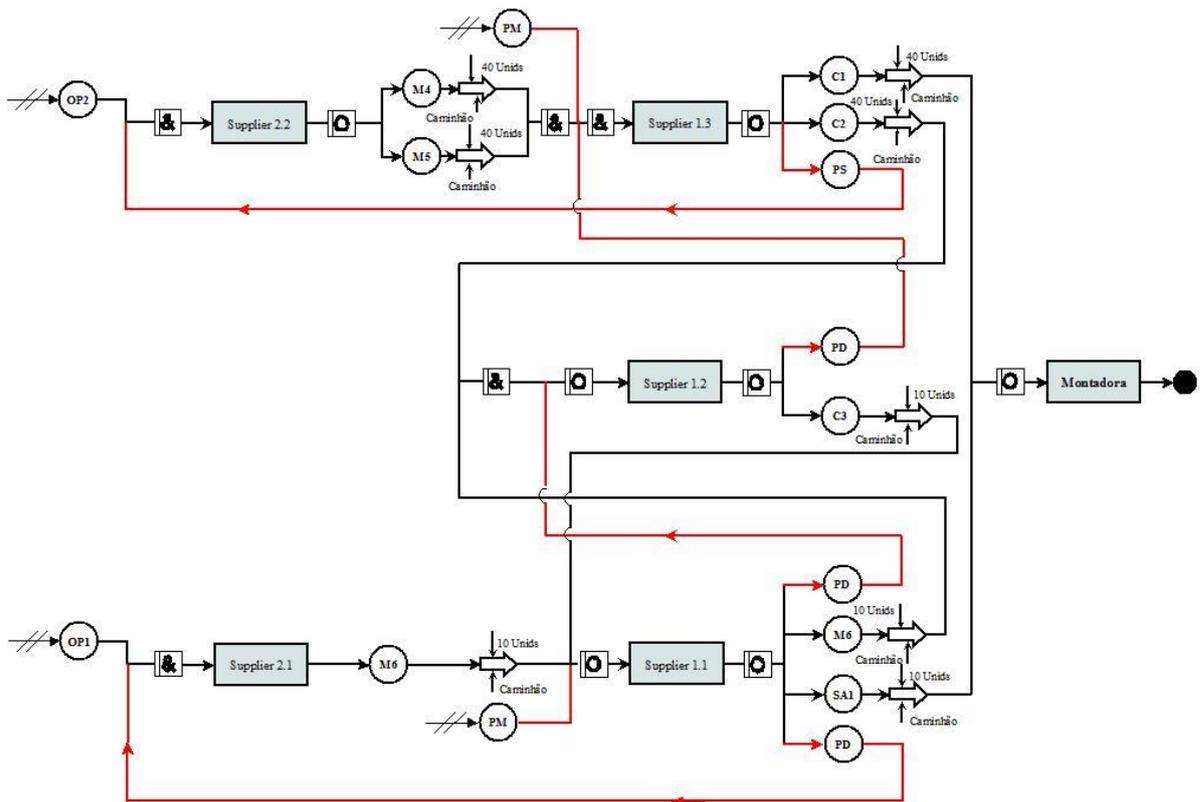
As relações entre entradas, processamentos e saídas da Figura 20, mostra, por exemplo, que o *Supplier 1.1* envia pedidos diários (PD) do material M6 ao *Supplier 2.1* para processar e enviá-lo ao *Supplier 1.1*. A lógica segue nas demais partes do SIPOC. A partir da ferramenta IDEF-SIM (MONTEVECHI et al., 2010), o modelo conceitual (Figura 21) foi desenvolvido com base nas informações fornecidas pelas Figuras 18-20. O IDEF-SIM é uma ferramenta de modelagem gráfica estruturada para o modelador sistematizar e converter as observações do sistema no modelo computacional. O Quadro 31 ilustra a simbologia utilizada pela ferramenta IDEF-SIM. A justificativa para o uso dessa ferramenta é que ela apresenta uma simbologia adequada para evitar distorções na translação do modelo conceitual para o computacional.

Quadro 31 – Simbologia IDEF-SIM

Símbolo	Significado	Símbolo	Significado
○	Entidade	↗	Fluxo de entrada no modelo
□	Funções (processamento)	●	Fim do sistema
→	Fluxo da entidade	△	Conexão com outra figura
□	Controles	⊓	Regra “E” para junção
↑	Recursos	⊔	Regra “E/OU” junção/divisão
⇨	Transporte e movimentação	⊗	Regra “OU” para divisão
→	Informação explicatória		

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 21 – Modelo conceitual geral da cadeia de suprimentos automotiva



**Notações:** OP (Ordem de Produção); M4 (Material 4); M5 (Material 5); C1 (Componente 1); C2 (Componente 2); C3 (Componente 3); SA1 (Submontagem 1); PS (Pedido semanal); PD (Pedido diário); Unids (Capacidade dos caminhões em Unidades); PM (Pedido da montadora a cada 2 horas); Fluxo físico → e Fluxo de informações →.

Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 21 ilustra as interrelações operacionais entre membros da CS automotiva portuguesa objeto de estudo. Os dados obtidos em Carvalho et al. (2012) também auxiliaram na criação, via IDEF-SIM, dos demais modelos conceituais (montadora e membros da CS). Para ilustrar, o APÊNDICE A mostra o modelo conceitual do *Supplier* 1.3, o qual detalha graficamente a lógica de operação do arranjo de acordo com a descrição enunciada na Figura 19, que trata do diagrama de fluxo dos processos SCOR® para cada elo e membro. Portanto, sete modelos conceituais foram desenvolvidos (*Suppliers* 1.1 a 1.3, 2.1 e 2.2, montadora e o modelo conceitual geral), evidenciando as relações desses membros com a empresa focal.

## 5.2.2 Modelagem dos dados de entrada

Os dados secundários dispostos no artigo de Carvalho et al. (2012) foram utilizados para o desenvolvimento do modelo computacional. No artigo das autoras os dados estão separados por membro, processo SCOR®, componentes e os materiais transacionados por cada membro. O Quadro 32 ilustra a natureza dos *Inputs* empregados no modelo computacional, conforme Carvalho et al. (2012).

Quadro 32 – Natureza dos *Inputs*

Aspecto	<i>Inputs</i>
Demanda	<i>Lead times</i> de pedidos, quantidade de pedidos, dados sobre requisição de entrega.
BOM	Árvore do subconjunto de materiais do veículo ( <i>Bill of Material</i> ).
Estoque	Nível máximo de inventário, período de revisão, estoque inicial e estoque de segurança.
Recursos	Tempos de processo e capacidades.
Custos	Materiais, recursos dependentes do tempo (suprimentos, produção e entrega), manutenção de estoque, custos indiretos.
Transporte	<i>Lead times</i> de transporte entre os membros da CS.

Fonte: Produção do próprio autor

Diversos *Inputs* são baseados em distribuições de probabilidade e, por conseguinte, assumem comportamentos estocásticos, representando a realidade do sistema que foi simulado, como por exemplo, o uso da distribuição triangular para modelar *lead times* de processo. Carvalho et al. (2012) coletaram e modelaram os dados obtidos por meio de entrevistas com os gerentes de operações e logística. Dados sobre a seleção prévia do RL compreendendo a mensuração, priorização e avaliação do risco não foram considerados, uma vez que não se teve quaisquer informações acerca dos possíveis riscos na cadeia.

### 5.2.3 O modelo de simulação

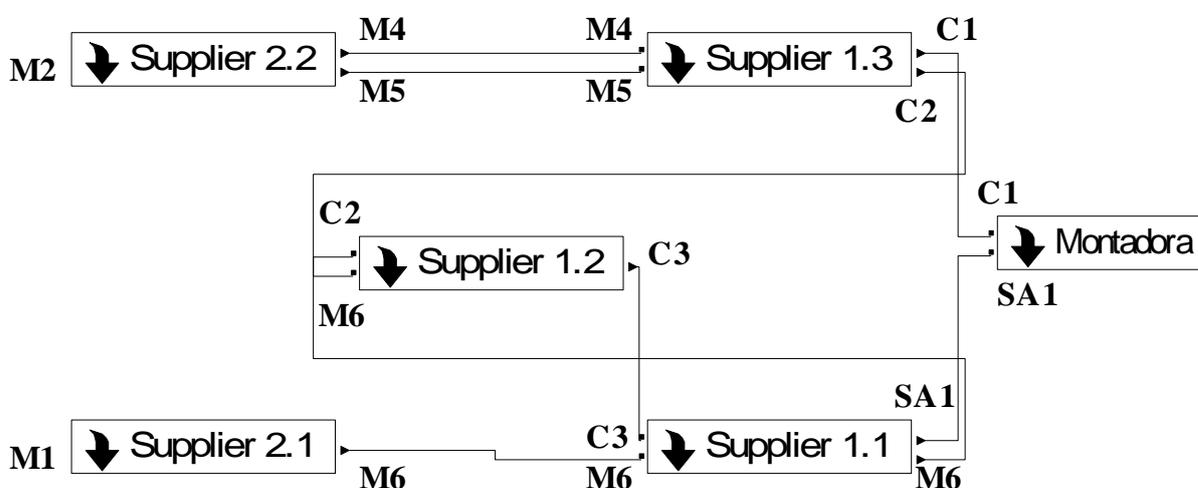
De acordo com as características da CS em análise e da rede de operações logísticas, decidiu-se por escolher a SED como o tipo de simulação, uma vez que ela é apropriada para lidar com sistemas complexos, conforme os argumentos expostos na seção 2.6.2. Quatro justificativas balizam a escolha da SED: complexidade nas interações entre membros da cadeia e processos de negócios; natureza estocástica dos processos; capacidade em modelar relações não lineares e contínua mudança no estado das variáveis ao longo do período. O modelo de simulação foi elaborado no software Arena<sup>®</sup>, versão 14.0. O passo subsequente foi estabelecer o modelo computacional. Assim, inúmeras simplificações e limitações foram consideradas em face da caracterização da CS em estudo e de suas operações, como mostra a lista que se segue:

- exceções ao registro de produtos recebidos e emissão de pedidos, nenhum processo da montadora foi simulado;
- o planejamento da produção dos membros é realizado no sistema MTO e os pedidos são programados para a produção atendendo a regra FIFO;
- o fluxo reverso de materiais ou produtos acabados não foi simulado, já que materiais defeituosos foram desconsiderados;
- custos de manutenção e aquisição de recursos não foram incluídos na modelagem. Os custos de processamento são proporcionais ao tempo gasto no atendimento;
- custos fixos, de carregamento e descarregamento não foram abrangidos pelo modelo de simulação;
- os fornecedores de segunda camada têm nível de estoque de material infinito, não desempenhando atividades de suprimentos;
- a demanda é puxada ao longo da CS, sendo completamente preenchida em termos de produto final;
- o planejamento dos suprimentos, produção e distribuição seguem uma política de revisão periódica;
- os processos estocásticos são ajustados conforme distribuições triangulares;
- a montadora exige que os seus fornecedores de primeira camada (*Suppliers* 1.1 e 1.3) mantenham estoques de materiais para no mínimo três dias.

O processo de desenvolvimento computacional se iniciou pela organização das operações de cada membro em subsistemas, conforme caracterização apontada no fluxograma da Figura 16, quais sejam: emissão do pedido e demanda, sistema de estoques, logística planta, produção, distribuição, compras e suprimentos, totalizando sete subsistemas alinhados ao SCOR®. Os subsistemas dos membros da CS foram desenvolvidos passo a passo, testando as entradas, processamento e as saídas de cada módulo e verificando se todas as condições dispostas nos modelos conceituais foram atendidas no modelo computacional.

Após o desenvolvimento dos subsistemas dos membros, a parametragem inicial do modelo foi implantada para reproduzir uma aproximação real da dinâmica de operação da CS explorada. Nesta ordem, os macros processos da CS, os processos logísticos, as medidas de desempenho (SMD-KPIs) e as métricas de riscos foram devidamente inseridas no modelo. A Figura 22 ilustra o modelo de simulação elaborado a partir dos modelos conceituais ilustrados na seção 5.2.1. Esse modelo difere dos demais, pois foi criado com base no conceito de submodelos.

Figura 22 – O modelo geral de simulação da cadeia de suprimentos automotiva



Fonte: Produção do próprio autor

Conforme a Figura 22, cada caixa representa um membro da CS e contém outros submodelos desenvolvidos sob a forma de lógica computacional. M4, M5, M6, C1, C2, C3 e SA1 são os materiais (M) e os componentes (C) transformados e montados pela cadeia. As setas na Figura são típicas da representação de submodelos no Software ARENA®.

A Figura 24 ilustra a lógica computacional de um subsistema para o processo de distribuição do material M6 realizado pelo *Supplier 1.1*. Após a criação da lógica computacional, o SMD – KPIs foi inserido ao modelo para permitir a avaliação das métricas ativando-se a animação do modelo. Assim, um painel de indicadores (*dashboard*) de desempenho foi elaborado, como mostra a Figura 23. Os valores mostrados não representam o resultado final obtido após as replicações, mas um *snapshot* (foto) tomado aos 20 dias de execução da simulação, incluindo as métricas custo logístico, risco de *stockout* e tempo de *stockout*. O tempo de ruptura (h) foi medido a partir de um contador que registrou o período em que não houve o recebimento dos suprimentos e produtos programados.

Figura 23 – Painel sistema de medição de desempenho/KPIs do modelo de simulação

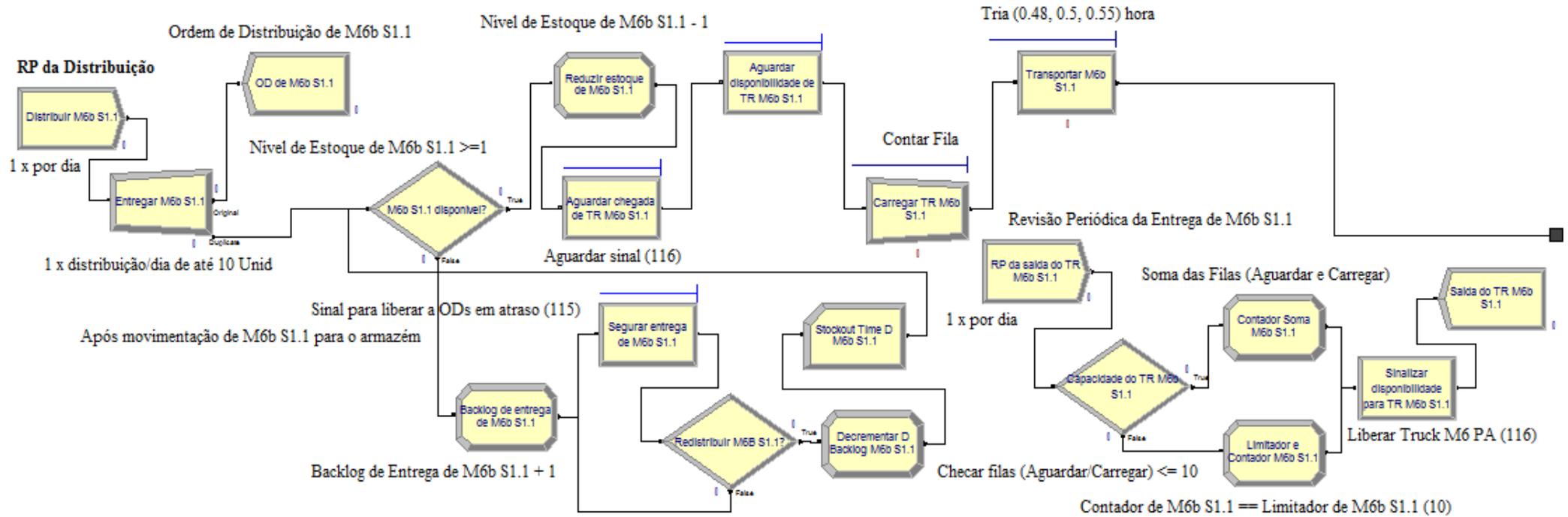
SMD KPIs	Custo Logístico (\$)	Risco (\$)	Tempo Stockout (h)
Supplier 1.1	2 4 9 . 8 0	0 . 0 0	0 . 1 9
Supplier 1.2	1 1 0 . 7 6	0 . 0 0	0 . 0 0
Supplier 1.3	3 1 6 . 4 1	4 . 6 1	7 . 9 3
Supplier 2.1	8 9 . 1 8	0 . 3 0	2 . 2 4
Supplier 2.2	6 7 6 . 3 0	0 . 5 5	2 . 5 6
<b>Global</b>	1 4 4 2 . 4 6	5 . 4 6	1 2 . 5 0

Fonte: Produção do próprio autor

O próximo passo foi preparar a execução do modelo, definindo aspectos, tais como: tamanho do período a ser simulado, o período de *warm-up* ou de aquecimento e o cálculo do número de réplicas. Para Carvalho et al. (2012) o sistema é não terminal, cujas condições iniciais da simulação podem influenciar o desempenho das variáveis caso o período de *warm-up* não seja adicionado aos acumuladores estatísticos. Os resultados sobre as variáveis de resposta não devem ser influenciados pelas condições iniciais de operação do modelo de simulação.

As mesmas condições reproduzidas por Carvalho et al. (2012) foram adotadas. O período da simulação foi definido em 55 dias, cada dia com 8 horas, totalizando 440 horas de simulação. O período de *warm-up* foi configurado para 20 dias. Uma vez que o sistema é *steady-state* (sistema não terminal), a técnica de visualização da série temporal foi usada para determinar o período de *warm-up*. As medidas de desempenho foram calculadas a partir do dia 20.

Figura 24 – Lógica de um subsistema do *Supplier* 1.1



Fonte: Produção do próprio autor

O dimensionamento de réplicas foi realizado conforme Banks et al. (2004), Kelton, Sadowski e Sturrock (2006) e Rossetti (2016). As variáveis Custo logístico total (\$) e Risco de *Stockout* (\$/tempo) foram utilizadas para verificar a precisão desejada de acordo com o intervalo de confiança (IC) calculado a um nível de significância  $\alpha$  de 5%. Uma precisão de 5% em torno da média entre replicações da variável foi adotada para atestar o número adequado de réplicas. Carvalho et al. (2012) projetaram 30 réplicas como adequadas na pesquisa. Para confirma-las, este mesmo número de corridas foi utilizado como piloto amostral no cálculo da precisão. O teste de hipótese “t” de *Student* (MONTGOMERY; RUNGER, 2014) foi usado para verificar o nível de precisão desejado em torno da média para o IC considerado. A Tabela 3 mostra os resultados do teste “t” para 29 graus de liberdade ( $\nu$ ) e outras estatísticas.

Tabela 3 – Dimensionamento de réplicas para as variáveis

Parâmetros	Custo Logístico	Risco de <i>Stockout</i>	Unidade
Amostra	30	30	Réplicas
Média (Xbarra)	3.189,60	75,15	\$
Alvo (Xbarra)	3.190,00	75,10	\$
Desvio-Padrão (S)	34,44	2,88	\$
Valor mínimo	3.096,20	68,23	\$
Valor máximo	3.233,80	79,33	\$
P-Valor do teste	95,2	92,8	%
P-Valor (Normalidade)	8,8	29,4	%
Precisão de 5%	159,48	3,76	\$
Semintervalo $h$	12,90	1,07	\$
IC	[3.176,80; 3.202,50]	[74,07; 76,22]	\$

Fonte: Produção do próprio autor

O número adequado de réplicas é definido avaliando-se o semintervalo  $h$  em confronto com o nível de precisão. O semintervalo  $h$  é a distância entre a média e os limites do IC. Como o semintervalo  $h$  para as variáveis é menor que o nível de precisão em torno de suas médias, infere-se que 30 réplicas são suficientes para gerar os resultados adequados, possibilitando a execução consistente do modelo de simulação. Assim, confirma-se o número de replicações determinado por Carvalho et al. (2012).

Após o estabelecimento das corridas, o próximo passo foi executar o modelo de simulação a partir das configurações do modelo computacional e da execução. O modelo foi executado em uma máquina (computador) equipada com um processador Intel Core i7 3.4 GHz. A duração da execução do modelo de simulação com a animação ativada foi de 4 horas e 20 minutos. Já com a animação desativada este tempo foi reduzido para 25 minutos.

## 5.2.4 Verificação e Validação

Os procedimentos de verificação e validação utilizados neste trabalho de tese se basearam nos trabalhos de Balci (2012), Sargent (2013) e Kleijnen (1999; 2015). Busca-se testar se o modelo de simulação é preciso o suficiente para representar, com uma boa aproximação, o comportamento do sistema simulado. A verificação tem por finalidade conferir se o modelo computacional foi devidamente desenvolvido conforme o modelo conceitual. O Quadro 33 mostra as técnicas de verificação usadas nesta pesquisa.

Quadro 33 – Procedimentos de verificação

Procedimento	Ação
Diagramação	Verificar se o modelo computacional foi elaborado de acordo com o modelo conceitual construído sob a forma de diagramação de fluxos.
Modularização	Implantar o modelo computacional modularizando o sistema e dividindo o desenvolvimento em submodelos.
Relações I/O	Verificar as relações de causalidade entre <i>Inputs</i> e <i>Outputs</i> , checando-se os parâmetros de entrada e suas respectivas saídas.
Animação	Utilizar a animação gráfica de funcionamento do modelo para verificar se as relações entre membros da CS e processos foram devidamente implantadas.
Teste de parâmetros	Testar a inserção e consistência dos parâmetros de acordo com os dados do modelo original.
Planilhas (Arena®)	Checar a parametrização do modelo via planilhas inclusas no software de simulação.
Relatórios	Avaliar os resultados gerados nos relatórios de saídas do software Arena® para cada submodelo.
<i>Debugger e Trace file</i>	Usar o depurador e rastreador disponíveis do software de simulação para checar os erros durante a construção do modelo computacional.
Código SIMAN	Conferir a linguagem de programação SIMAN fornecida pelo software em confronto com os módulos da lógica computacional.

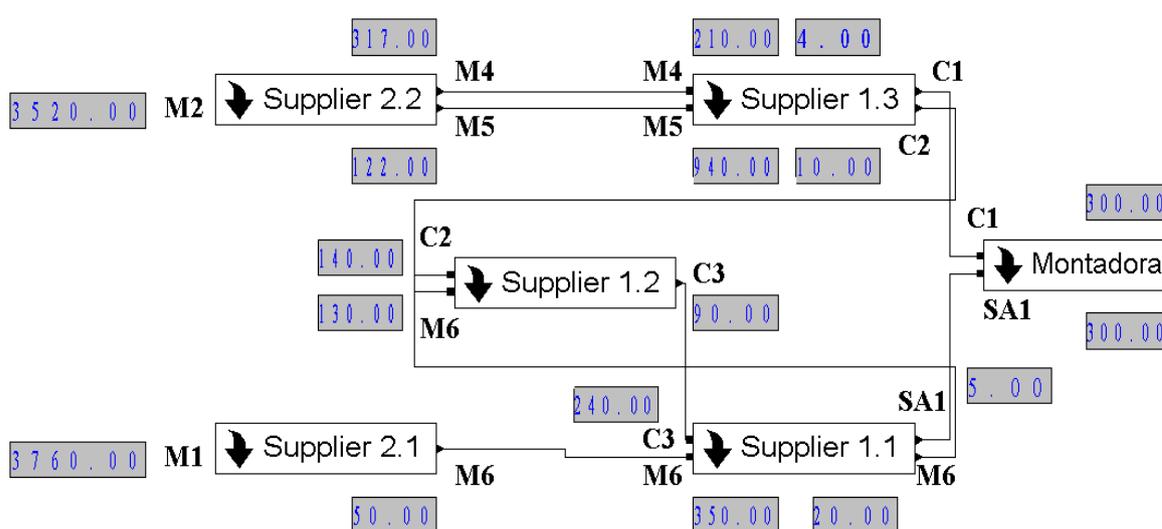
Fonte: Banks et al. (2004); Robinson (2004); Sargent (2013) e Kleijnen (1999; 2015)

Os diagramas de fluxos dispostos na seção 5.2.1 foram utilizados para desenvolver o modelo computacional com destaque para os submodelos elaborados em IDEF-SIM. Cada submodelo criado no software de simulação foi checado cuidadosamente com o seu respectivo IDEF-SIM e os demais modelos, fluxogramas e SIPOC. O objetivo foi evitar vieses e distorções quanto à representação da dinâmica de operações no modelo de simulação.

A técnica de implantação modular foi utilizada na construção do modelo de simulação, o qual foi segmentado em três níveis hierárquicos: membro da CS, dinâmica dos macroprocessos SCOR® (subsistemas) e elementos de operação de cada subsistema. Após a parametrização dos *inputs* nos subsistemas as respectivas saídas foram testadas, módulo a módulo, com o fim de atestar as relações I/O em cada submodelo e checar a sua lógica relacional.

A animação de cada submodelo foi introduzida para checar a dinâmica nos níveis citados com o auxílio de contadores digitais e gráficos que mostraram os resultados das variáveis após as saídas de cada subsistema. A técnica de animação também foi usada para verificar a dinâmica geral de funcionamento da cadeia. A Figura 25 mostra, por exemplo, um teste para variáveis níveis de estoque de produtos acabados e de materiais nas entradas e saídas de cada membro. Os parâmetros de entrada foram testados avaliando-se a dinâmica com ajuda da animação e das variáveis sob a forma de contadores gráficos.

Figura 25 – Níveis de estoque dos membros da cadeia de suprimentos



Fonte: Produção do próprio autor

Os parâmetros de entrada do modelo de simulação foram checados a partir das planilhas de *Inputs* no software Arena® dispostos em cada módulo de desenvolvimento. Os resultados das principais variáveis de interesse foram verificados nos relatórios emitidos pelo software de simulação. O *tracer* e *debugger* (rastreadores de erro) do software Arena® foram utilizados para corrigir erros, tendo relevante utilidade na programação computacional. Estes recursos sinalizam os erros e indicam possíveis caminhos para se rastrear a origem deles. Por fim, os códigos da programação SIMAN (linguagem de programação) foram verificados, checando-se as informações em confronto com os dados inseridos nos módulos de lógica do modelo. A fase de validação atesta se os resultados produzidos pelo modelo de simulação são precisos em comparação com os *outputs* gerados por um sistema real ou outro modelo (ROBINSON, 2004). Alguns procedimentos relatados por Sargent (2013) e Kleijnen (1999) foram usados para validar o modelo de simulação. Assim, o Quadro 34 ilustra estas técnicas.

Quadro 34 – Procedimentos de validação

Procedimento	Ação
Validação conceitual	Validar o modelo conceitual em termos de seus pressupostos, simplificações e teorias.
Modelagem determinística	Comparar as estatísticas de saídas geradas pelos modelos determinístico e estocástico.
Análise de sensibilidade	Variar <i>inputs</i> nas variáveis de entrada e testar que variáveis de saída são sensíveis a tais variações.
Validação <i>white-box</i>	Validar partes do modelo de simulação comparando com os parâmetros da CS simulada.
Animação	Checar se a dinâmica gerada pelo modelo de simulação ao longo do tempo corresponde aos dados, informações e fluxos da CS automotiva.
Validação <i>black-box</i>	Determinar se o desempenho global das variáveis de interesse apresenta uma precisão adequada se comparado ao mundo real de outro modelo válido.
Comparação gráfica	Comparar se o desempenho gráfico de variáveis de resposta corresponde ao comportamento do sistema simulado.
Validação interna	Determinar se as replicações apresentam diferenças estatísticas significantes em termos de variabilidade.
Matriz de relação causal	Analisar as correlações entre variáveis chaves de desempenho e determinar aquelas que mais influenciam a resposta produzida no modelo de simulação.

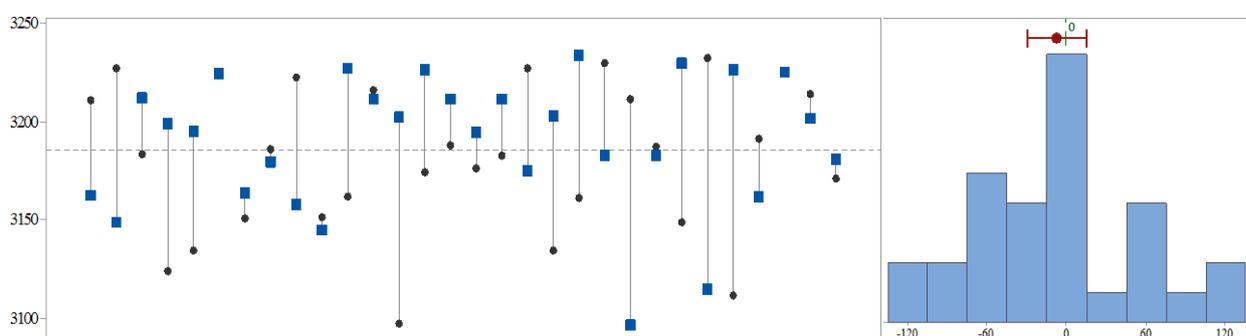
Fonte: Banks et al (2004); Robinson (2004); Sargent (2013) e Kleijnen (1999; 2015)

A validação do modelo conceitual foi realizada em diversas fases. Na construção do modelo de simulação várias dinâmicas foram validadas e comparadas aos parâmetros de entrada e aos fluxogramas. Assim, vários módulos foram testados em relação, por exemplo, aos *lead-times* de distribuição e emissão de pedidos; mecânicas de revisão periódica para os subsistemas de produção, entrega, suprimentos e compra; custeio dos processos e materiais; capacidades dos recursos; tempos de processamento; políticas FIFO e MTO; quantidade produzida, pedida e distribuída; níveis de estoque, entre outros aspectos. Nesse sentido, esse tipo de validação foi complementado pelo uso da animação, validando as inúmeras dinâmicas, dados de entrada e parametrizações. Além disso, houve a aplicação de cálculos preditivos que foram comparados com os contadores estatísticos para as variáveis validadas.

A modelagem determinística foi utilizada para comparar se existem diferenças significativas entre os modelos determinístico e estocástico. Ou seja, os parâmetros estocásticos de entrada foram transformados em determinísticos. Assim, esses modelos foram comparados com o fim de determinar as diferenças entre eles. As saídas geradas pelos modelos são as mesmas? Para comparar os resultados desses dois modelos, as variáveis Custo logístico e Risco de *Stockout* foram usadas. O teste estatístico pareado *t* de *Student* foi aplicado para determinar se existem diferenças significativas entre as amostras dos dois modelos para essas variáveis.

Para a variável custo logístico, a um nível de significância de  $\alpha$  de 5%, a média das diferenças para 30 réplicas foi determinada como  $-7,65$  e desvio-padrão de  $59,95$ . Já o IC (95%) para as diferenças foi estimado em  $[-30,04; 14,73]$ . Como o valor “0” está contido no intervalo, não há evidência suficiente para afirmar que as médias diferem a esse nível de significância. O P-valor obtido para o teste foi de 49%, sendo maior que o  $\alpha$  de 5%. As médias e desvios para os modelos determinístico e estocástico foram, respectivamente,  $3.182,00$  e  $3.189,60$ ; e  $38,32$  e  $34,44$ . A Figura 26 ilustra a distribuição de frequência das diferenças e a centralidade para o valor “0” e a distribuição par a par dos valores individuais nominais.

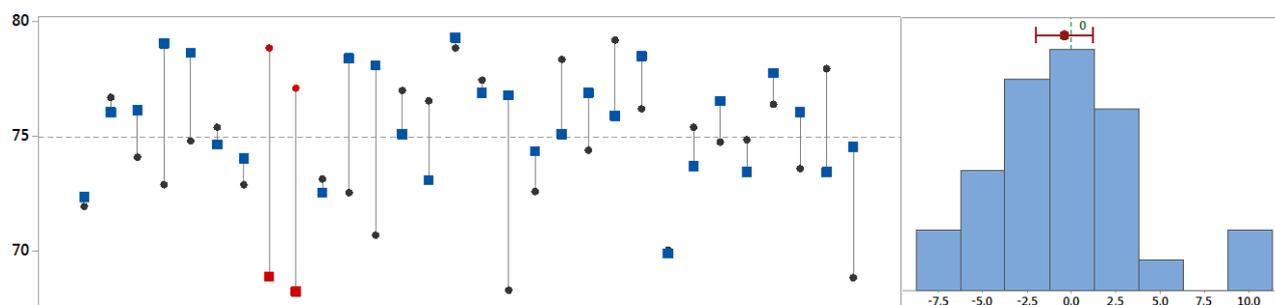
Figura 26 – Teste pareado para a variável custo logístico



Fonte: Produção do próprio autor

Para o risco de *stockout* a média das diferenças para 30 réplicas foi de  $-0,42$  e desvio-padrão de  $4,23$  e o IC (95%) de  $[-2,00; 1,16]$ . Como o valor “0” está contido no intervalo, conforme histograma mostrado na Figura 26, não existe evidência suficiente para afirmar que as médias diferem ao nível de significância  $\alpha$  de 5%. O P-valor obtido para o teste foi de 59,2%, sendo maior que o  $\alpha$  de 5%. Assim, os resultados são bons para comprovar que não há diferenças entre os modelos determinístico e estocástico. As médias e desvios para esses modelos foram, respectivamente,  $74,73$  e  $75,15$ ; e  $2,96$  e  $2,88$ .

A Figura 27 ilustra a distribuição das diferenças, a centralidade (“0”) e a distribuição par a par dos valores individuais nominais. Apesar dos conjuntos terem apresentado valores não usuais (dados em vermelho), o teste de *Outliers* de Grubbs não apontou tais discrepâncias. Não há evidências para rejeitar a hipótese nula de que todos os dados vêm da mesma população normal, com P-valores de 71,3% e 35,6% e Teste G (Grubbs) de 2,18 e 2,40, em ordem, para os modelos determinístico e estocástico. Portanto, os resultados esboçados no gráfico são bem aceitos para comprovar que não há diferenças significativas entre os modelos.

Figura 27 – Teste pareado para a variável risco de *stockout*

Fonte: Produção do próprio autor

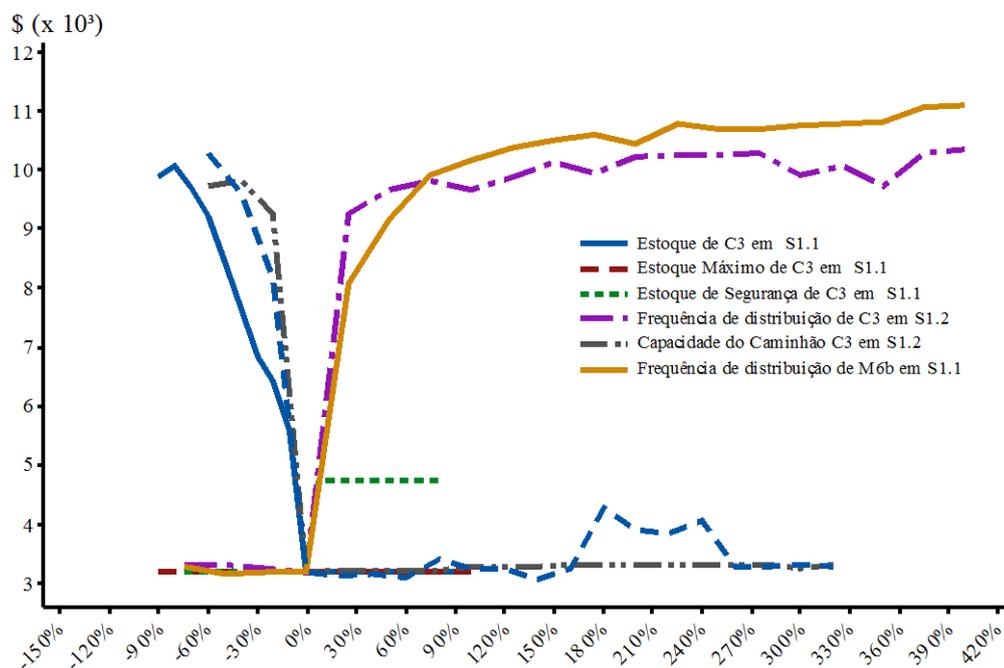
A análise de sensibilidade foi empregada para validar o modelo computacional. Os *inputs* das seguintes variáveis: estoque de C3, estoque máximo de C3, estoque de segurança de C3, intervalo de distribuição de M6, capacidade do caminhão - M6, intervalo de distribuição C3 e capacidade do caminhão – C3 foram variados, no sentido de se determinar quais delas seriam sensíveis a tais variações. As primeiras cinco variáveis são performadas pelo *Supplier 1.1*. As outras duas estão sob o domínio do *Supplier 1.2*.

O *Supplier 1.1* foi selecionado por ser um fornecedor de primeira camada e crítico para a entrega do produto SA1. As variações se deram por incrementos e decrementos percentuais nos valores originais. As mudanças foram analisadas sobre três variáveis de resposta: custo logístico total, risco de *stockout* e taxa *fill-rate*. Esse índice mensura a relação % entre as unidades totais entregues (QD) na CS e as unidades pedidas (QP), conforme Equação 4. A Figura 28 ilustra a sensibilidade dos *inputs* sobre o custo logístico.

$$\text{Fill-Rate (\%)} = [(QD/QP) \times 100] \quad (4)$$

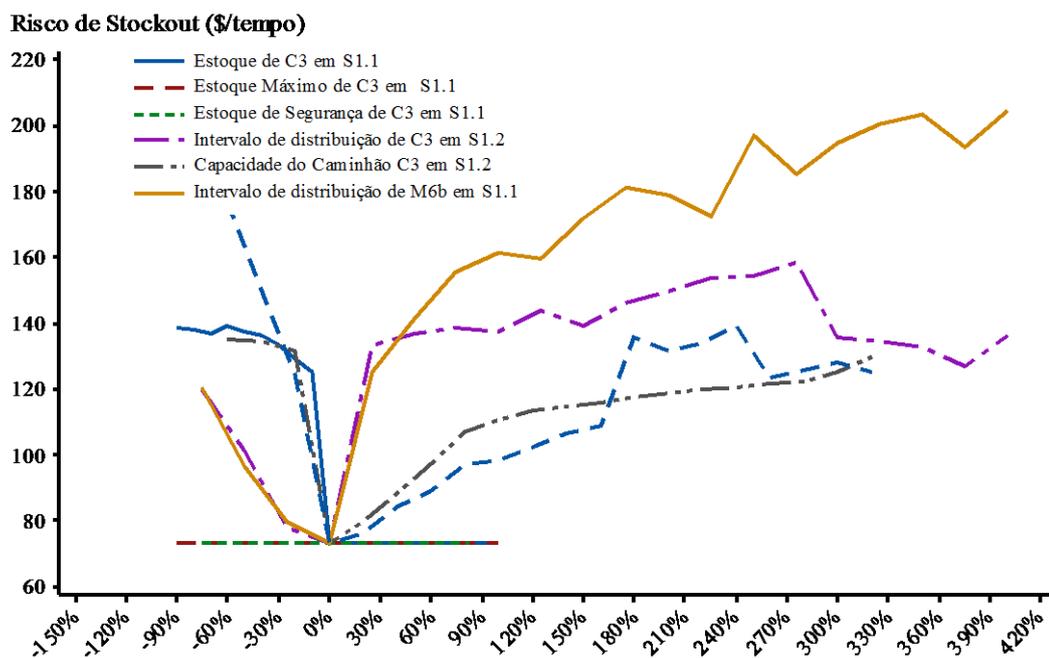
De acordo com a Figura 28, percebe-se que o custo logístico se eleva quando os intervalos entre entregas são espaçados. As reduções no estoque de C3 e das capacidades dos caminhões também provocam relevantes custos. As demais variáveis não produzem efeitos significantes neste índice. Incrementos de até  $\pm 90\%$  são mais sensíveis às mudanças sobre os valores de custo.

Figura 28 – Análise de sensibilidade sobre o custo logístico



Fonte: Produção do próprio autor

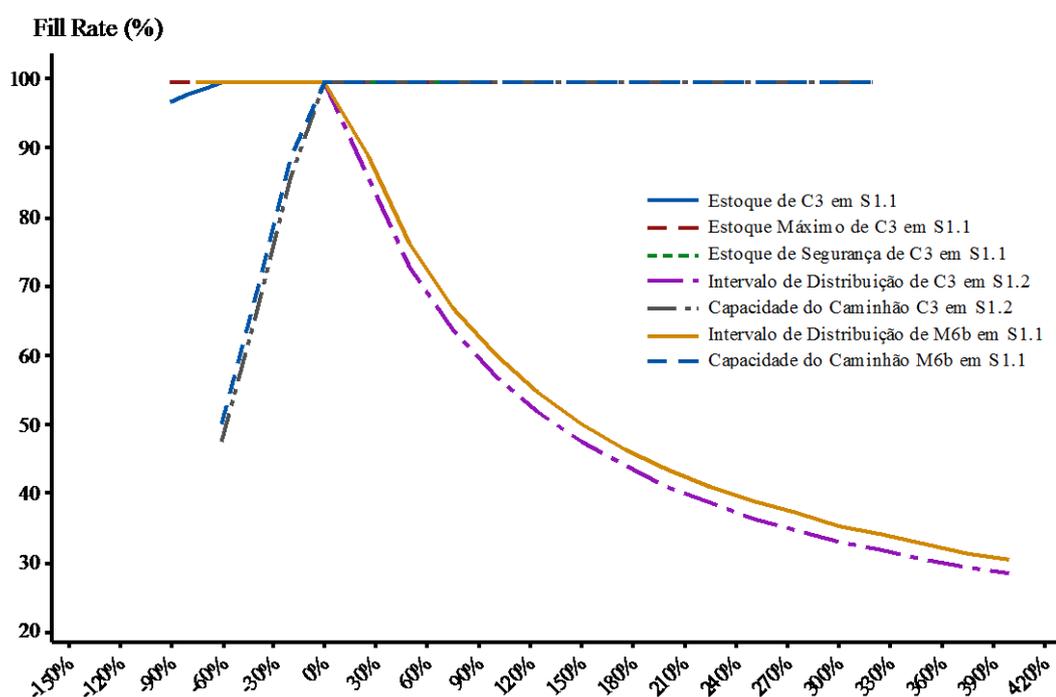
Já a Figura 29 ilustra a análise de sensibilidade realizada para o risco de *stockout* em relação às mesmas variáveis.

Figura 29 – Análise de sensibilidade sobre o risco de *stockout*

Fonte: Produção do próprio autor

Como o custo logístico, o risco de *stockout* é elevado por revisões periódicas de distribuições menos frequentes. Em linha, aumentos significativos nas capacidades dos caminhões também produzem riscos importantes. Assim, a variável intervalo de distribuição do material M6b no *Supplier* 1.1 provoca sensíveis alterações no risco de *stockout*. Alterações sobre a taxa *fill-rate* são demonstradas na Figura 30.

Figura 30 – Análise de sensibilidade sobre o *fill-rate*



Fonte: Produção do próprio autor

Conforme demonstra a Figura 30, os valores sobre os estoques não alteram a resposta sobre o nível de serviço. Quando as capacidades dos caminhões são incrementadas, observa-se um aumento na taxa do *fill-rate*. Todavia, quando os intervalos entre as distribuições dos itens aumentam, essa taxa cai drasticamente. Para completar a análise de sensibilidade sobre as variáveis de resposta, análises de correlação e de regressão foram realizadas cruzando-se os *inputs* intervalo de distribuição e capacidade do caminhão com o *fill-rate*. A Tabela 4 ilustra os dados obtidos a partir das ferramentas. Considerando um nível de confiança de 95%, pode-se comprovar a forte correlação entre as variáveis de entrada e a taxa *fill-rate*. Os P-Valores resultantes abaixo do menor nível de significância (5%) também reforçam as relações. Já os coeficientes de regressão simples ( $R^2$ ) entre as variáveis foram obtidos testando-se os modelos lineares, quadráticos e cúbicos. Os ajustes foram para os maiores valores.

Tabela 4 – Análise de correlação e regressão sobre o *fill-Rate*

Variáveis de entrada	P-Valor	R <sup>2</sup> (%)	Melhor modelo
Intervalo de entrega de C3	0,000	97,2	Cúbico
Capacidade caminhão C3	0,000	88,8	Cúbico
Intervalo de entrega de M6	0,000	97,3	Cúbico
Capacidade caminhão de M6	0,000	87,6	Cúbico

Fonte: Produção do próprio autor

A validação *white-box* foi usada em conjunto com a animação do modelo de simulação. Cada parte dos submodelos foi testada individualmente avaliando-se a relação entrada, processo e saída em confronto com as mecânicas dos processos de negócios, sistema logístico e revisão periódica. Os parâmetros do modelo real foram comparados com os do modelo de simulação a partir da animação e inserção de indicadores de níveis, contadores estatísticos e gráficos. O uso combinado dessas técnicas permitiu avaliar a precisão dos valores simulados em relação aos parâmetros do modelo real.

A validação *black-box* foi usada para comparar alguns pressupostos (validação conceitual) e variáveis globais pertencentes aos dados do mundo real e do modelo simulado. Assim, dois dos principais pressupostos foram validados no modelo de simulação: (a) manutenção de no mínimo três dias de estoques de materiais para os fornecedores diretos e (b) preenchimento total da demanda da montadora. Ou seja, ao final dos 55 dias de simulação, 2.200 unidades de C1 e 2.200 unidades de SA1 deveriam ser entregues à montadora. A Tabela 5 mostra os níveis de estoque mantidos pelos fornecedores diretos (*Suppliers* 1.1 e 1.3) e o terceirizado (*Supplier* 1.2) e os níveis de serviço exigidos pela montadora gerados pelo relatório do software.

Tabela 5 – Valores mínimos e máximos dos estoques em unidades

Estoques (Unids)	Membro	Natureza	Mundo real	Modelo
M4	S1.3	Material*	120	160
M5	S1.3	Material*	240	250
C2	S1.2	Material*	80	80
M6	S1.2	Material*	80	80
C3	S1.1	Material*	240	240
M6	S1.1	Material*	240	260
C1	Focal	Produto	2.200	2.190 <sup>#</sup>
SA1	Focal	Produto	2.200	2.190 <sup>#</sup>

Nota: \* Material ou componente usado como insumo; <sup>#</sup> Produtos entregues à montadora, Unids (Unidades)

Fonte: Produção do próprio autor

Sobre os estoques de materiais a serem mantidos nos fornecedores, o modelo de simulação atendeu este pressuposto, produzindo as saídas desejadas. Deve-se observar que ao invés das 2.200 unidades de C1 e 2.200 unidades de SA1 a serem entregues à montadora, de fato 2.190 foram distribuídas, o que permitiu um *fill-rate* de 99,55%. Portanto, não se obteve os 100% de confiabilidade. Há uma explicação plausível que permite a aproximação para 100%. Um dos pressupostos afirma que após duas horas do pedido realizado pela montadora, os produtos devem ser entregues pelos *Suppliers* 1.1 e 1.3. A entrega é realizada pelo sistema *Milk-Run* e considerando a programação da distribuição, 10 unidades de cada fornecedor ficariam como entregas pendentes após as duas horas do dia seguinte. De acordo com a Equação 5, buscou-se determinar a confiabilidade da distribuição em torno do *fill-rate*:

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (5)$$

**Onde:**

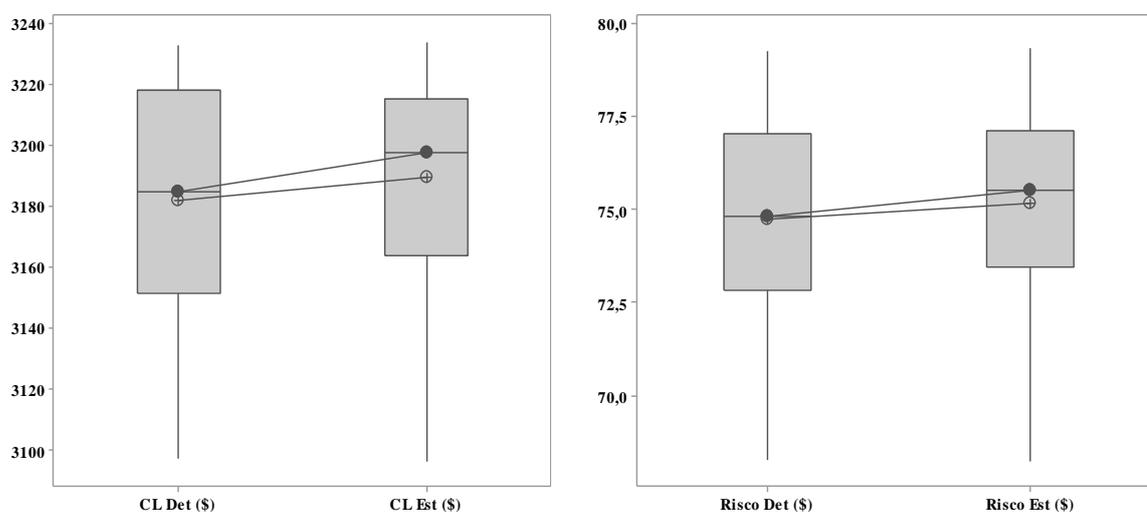
$R_s$  é a confiabilidade da distribuição

$n$  é o número de *Suppliers*

$R_i$  é a taxa *fill-rate* obtida pelo *Supplier*

Como os *Suppliers* 1.1 e 1.3 estão em paralelo e são independentes, a confiabilidade calculada do processo de distribuição ficou estimada em 99,99% ou  $\cong 100\%$ . A técnica de comparação gráfica foi aplicada, por exemplo, para avaliar os *outputs* gerados pelos modelos estocástico (Est) e determinístico (Det), como mostra a Figura 31.

Figura 31 – Análise gráfica dos modelos estocástico e determinístico



Fonte: Produção do próprio autor

Conforme a Figura 31, obtida via ferramenta *Box-Plot*, é possível observar baixa variabilidade nas variáveis de resposta Custo logístico e Risco de *stockout* quando comparados os modelos determinístico e estocástico. Ambos os *Box-Plots* mostram a média e mediana dos conjuntos de dados para as 30 réplicas. O custo logístico do modelo **Det** é mais simétrico. Existe uma pequena variabilidade em relação ao modelo **Est**, que é assimétrico à esquerda. Contudo, ele é mais uniforme. Os comportamentos das saídas da variável Risco de *stockout* entre os modelos parecem bem mais simétricos e apresentam menos variabilidade. A validação interna foi realizada na seção 5.2.3, que inclui os procedimentos de dimensionamento das réplicas. Portanto, diferenças estatísticas significativas entre as replicações não foram observadas.

Para finalizar os procedimentos de validação do modelo de simulação, uma matriz de relação causal foi construída com o objetivo de testar relações relevantes entre variáveis de entradas e variáveis de resposta. Seis variáveis de controle e duas de resposta foram escolhidas para se construir uma matriz de relação causal a partir da análise de correlação. De acordo com os processos de negócios trocados com o *Supplier* 1.1 e as análises de sensibilidade, as seguintes variáveis de entrada foram definidas: o intervalo de distribuição do M6 (S2.1), a capacidade do caminhão de entrega de M6 pelo *Supplier* 2.1, o intervalo de distribuição do C3 (S1.2), a capacidade do caminhão para entrega de C3 pelo *Supplier* 2.1, o intervalo de distribuição do M6 (S1.1), a capacidade do caminhão de entrega de M6 pelo *Supplier* 1.1. As variáveis de resposta foram: custo logístico total, custo do *stockout* e *fill-rate* em *Supplier* 1.1.

Para elaborar a matriz de relação, 32 experimentos foram realizados com as variáveis sendo concomitantemente incrementadas e decrementadas em uma unidade. A Tabela 6 mostra a matriz de causalidade correlacionando as variáveis de entrada com as variáveis de resposta.

Tabela 6 – Matriz de relação causal

Variáveis de entrada	Custo logístico (\$)	Custo do <i>stockout</i> (\$) – S1.1	<i>Fill-rate</i> (%) – S1.1
Intervalo de distribuição M6 S2.1	0,715*	-0,715*	-0,849*
Capacidade do caminhão M6 S2.1	-0,715*	0,715*	0,849*
Intervalo de distribuição C3 S1.2	0,715*	-0,715*	-0,849*
Capacidade do caminhão C3 S1.2	-0,715*	0,715*	0,849*
Intervalo de distribuição M6 S1.1	0,715*	-0,715*	-0,849*
Capacidade do caminhão M6 S1.1	-0,715*	0,715*	0,849*

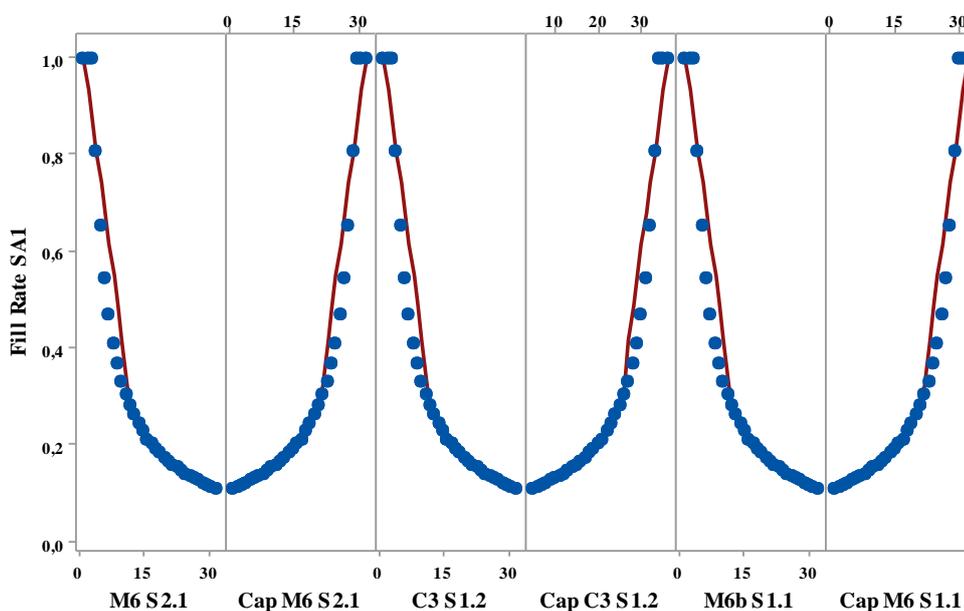
Nota: \* P-valor < 0,05

Fonte: Produção do próprio autor

De acordo com a Tabela 6, há uma forte relação de causalidade entre as variáveis relativas ao intervalo de distribuição e as capacidades dos caminhões. Na medida em que se aumentam os intervalos entre entregas dos produtos, o custo logístico total aumenta positivamente. Todavia, ele decresce quando as capacidades dos caminhões são incrementadas. O custo do *stockout* e *fill-rate* no *Supplier 1.1* reduzem na medida em que as distribuições são espaçadas. Caso haja aumento nas capacidades dos caminhões, as variáveis de respostas crescerão positivamente.

Coefficientes de Pearson se situam entre -1 e +1. Os valores acima de  $\pm 0,75$  até  $\pm 1$  indicam forte correlação entre duas variáveis. Os valores com (\*) representam os testes individuais de hipóteses para cada par de variáveis com P-valores  $< 0,05$ . Ou seja, há suficiente evidência, ao nível  $\alpha$  de 5%, que a correlação não é zero. As análises da Tabela 5 são complementadas pela matriz gráfica de dispersão, conforme Figuras 32 - 34.

Figura 32 – Matriz gráfica de dispersão para o *fill-rate Supplier 1.1*

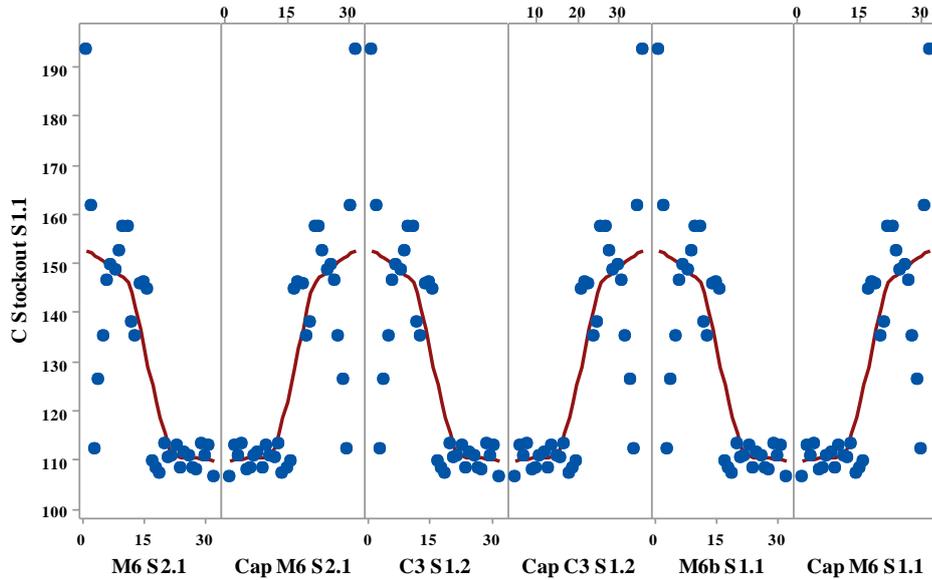


Fonte: Produção do próprio autor

Da esquerda para direita, conforme Figura 32, por exemplo, é possível observar uma forte correlação negativa. Ou seja, a taxa *fill-rate* diminui drasticamente quando o intervalo de distribuição do material M6 pelo *Supplier S2.1* é aumentado. Já o oposto ocorre quando a capacidade de entrega de M6 pelo mesmo fornecedor é incrementada. Ou seja, neste caso há uma forte correlação positiva, já que a taxa *fill-rate* se eleva com este incremento.

A Figura 33 ilustra as relações para o custo de *stockout* no *Supplier 1.1*. Na medida em que os intervalos de previsão vão aumentando, o custo de ruptura tende a cair devido ao aumento na frequência de entrega de M6 pelo *Supplier 2.1* ao *Supplier 1.1*, por exemplo.

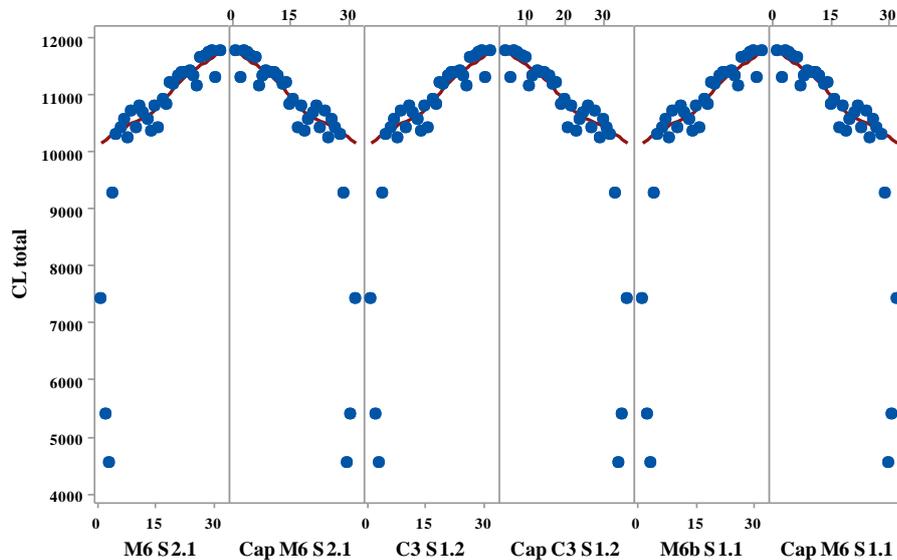
Figura 33 – Matriz gráfica de dispersão para o custo de *stockout* *Supplier 1.1*



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 34 mostra a matriz de dispersão relacionando as variáveis de entrada com o custo logístico total.

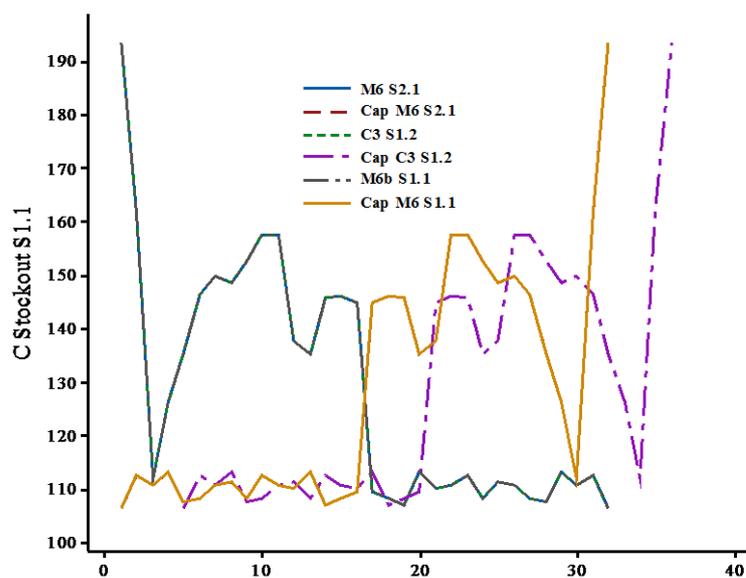
Figura 34 – Matriz gráfica de dispersão para o custo logístico total *Supplier 1.1*



Fonte: Produção do próprio autor

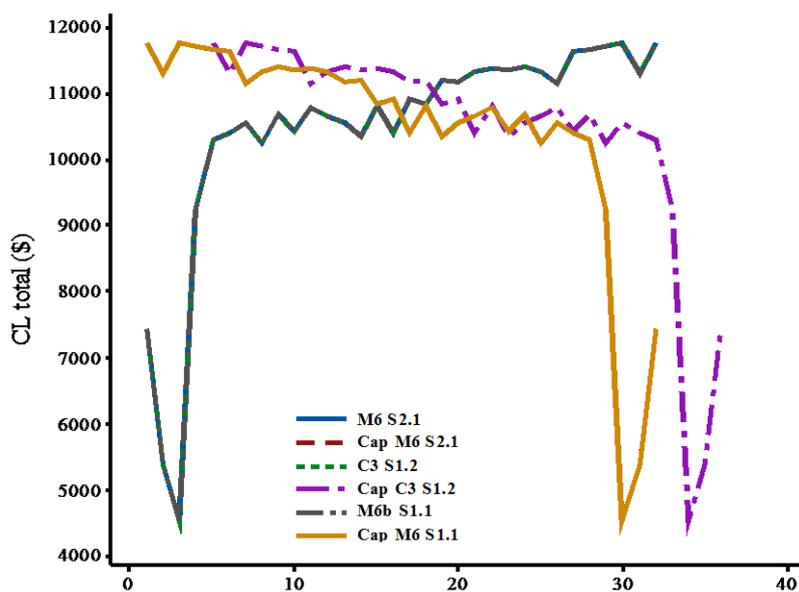
De acordo com a Figura 34 pode-se observar uma forte correlação quando o custo logístico total assume valores acima de \$ 10.000. Ou seja, os aumentos nos intervalos de distribuição tendem a elevar os custos, enquanto que incrementos em capacidades tendem a minimizar os custos. Isso ocorre, basicamente, à proteção que se dá aos estoques pelo transporte de mais unidades, evitando que haja rupturas no fluxo físico. As Figuras 35 - 37 mostram diagramas de dispersão sobrepostos das seis variáveis de controle correlacionadas com as respostas.

Figura 35 – Diagrama de dispersão para o custo de *stockout Supplier 1.1*

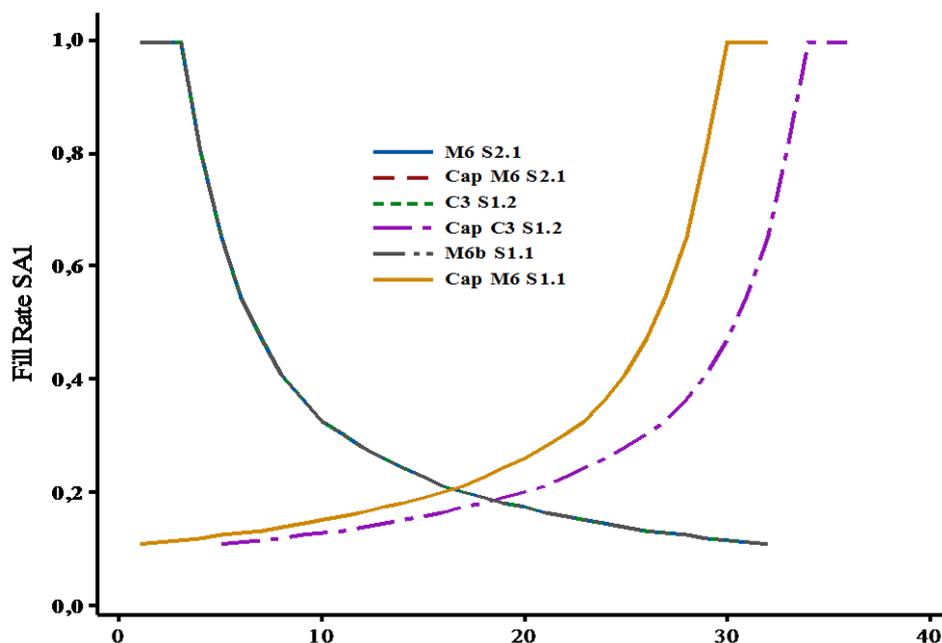


Fonte: Produção do próprio autor

Figura 36 – Diagrama de dispersão para o custo de logístico total *Supplier 1.1*



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 37 – Diagrama de dispersão para o *fill-rate* de SA1

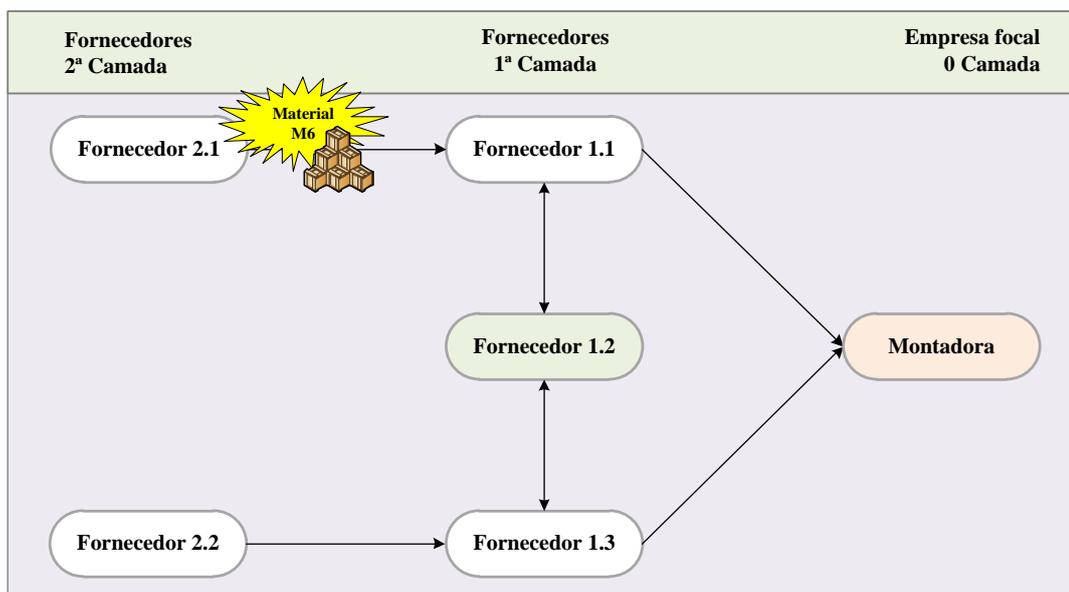
Fonte: Produção do próprio autor

Após a aplicação dos procedimentos de validação, conclui-se que o modelo de simulação é confiável e válido. Isso mostra que o processo de elaboração computacional foi consistente. As razões que justificam a validação do modelo se apoiam na comprovação dos pressupostos e simplificações; não diferença estatística entre os modelos determinístico e estocástico; nos testes de sensibilidade entre *inputs* e *outputs*, aplicação da animação e avaliação das métricas de desempenho; na precisão adequada alcançada pelo modelo; na não diferença estatística no dimensionamento de réplicas e nos bons resultados dos coeficientes de determinação gerados pelas análise de correlação.

### 5.2.5 Análise dos *outputs* do modelo

Um evento de risco no transporte do material M6 foi introduzido entre os *Suppliers* 2.1 e 1.1, disparado, por exemplo, por uma greve de caminhoneiros, tal como aquela ocorrida entre os dias 21 e 31 de maio de 2018, também conhecida como crise do diesel; protestos em estradas; quebras de veículos de transporte, entre outros. A perturbação foi introduzida no modelo de simulação em termos do risco de distribuição, provocando uma ruptura estocástica no fluxo físico do material M6 com frequência e duração variáveis, como mostra a Figura 38. Ou seja, a distribuição de M6 esteve indisponível para a entrega, conforme distribuição estocástica.

Figura 38 – Inserção do evento de risco de transporte



Fonte: Produção do próprio autor

Dois modelos de simulação foram comparados: (a) sem ruptura - caso básico (*basecase*) e (b) com ruptura de fluxo de M6. A partir da ruptura evidenciada no modelo perturbado entre os *Suppliers* 2.1 e 1.1, o custo logístico desse último, para trinta réplicas, se elevou para um total de \$ 1.217,90. Este aumento representa um incremento de 102,15% em relação ao custo do modelo base. Como o material M6 é enviado pelo *Supplier* 1.1 ao membro S1.2, o impacto econômico também foi propagado neste elo. Deste modo, o custo logístico do *Supplier* 1.2 passou de \$ 275,87 para \$ 7.808,94. Ou seja, um acréscimo de 2.730,66% sobre o valor do custo original. A entrega de M6 tem efeito em cadeia sobre a entrega do material SA1 pelo membro S1.1 à montadora, já que esse repassa M6 ao *Supplier* S1.2 para produzir o material C3, utilizando-o para produzir e entregar SA1 à empresa focal.

O desempenho operacional na entrega de SA1 à montadora foi afetado, como mostra a taxa *fill-rate* desse componente, caindo de 99,55% para 10,91%. O custo logístico total na CS subiu para \$ 11.317,82. Isso representa um aumento de 255,63%. Considerando o relevante impacto da ruptura do transporte para o desempenho da CS, deseja-se mitigar este risco por meio de estratégias de respostas que minimizem o custo logístico da cadeia e aumente a taxa *fill-rate*. Na sequência, a seção 5.2.5 ilustra o planejamento e aplicação das estratégias de mitigação aos efeitos provocados pela ruptura no fluxo do material M6.

### 5.2.6 Estratégias de resposta

No artigo de Carvalho et al. (2012) duas estratégias de mitigação foram usadas pelas autoras para mitigar as perturbações no sistema provocadas pela ruptura do fluxo físico no material M6: redundância, pela inserção de um estoque de amortecimento (*buffer*) para esse insumo no *Supplier* 1.2 e flexibilidade, pela subcontratação, a custos elevados, de um transporte para realizar a distribuição desse material para o *Supplier* 1.1. No planejamento das estratégias de resposta ao risco de transporte, duas decisões chave são relevantes no processo de mitigação: (a) o número de variáveis de controle e (b) o tipo e nível de risco a se mitigar.

Com relação ao tópico (a), o modelo de simulação apresenta razoável nível de complexidade, estruturado a partir da inserção de 300 variáveis que atenderam a diversas finalidades. No aspecto (b) deve-se dimensionar o nível de risco envolvido no elo para componentes, produtos acabados e respectivos processos. Os processos de distribuição envolvem seis variáveis de controle que podem afetar o desempenho logístico na CS. Sendo assim, deve-se considerar a existência de um *trade-off* relacionando o custo logístico total, o risco de *stockout* e a taxa *fill-rate*. Assim, o processo de distribuição de M6 foi escolhido para aplicar as estratégias de resposta ao RL, já que ele afeta a disponibilidade dos materiais a jusante da CS, amplificando os riscos de *stockout* das matérias-primas no processo *MAKE* dos membros subsequentes, notadamente, *Suppliers* 1.1 e 1.2 e a entrega da submontagem SA1 à montadora.

Considerando as interrelações de M6 na árvore do produto com outros componentes, cinco variáveis de controle foram selecionadas para o projeto e execução de experimentos, visando testar as estratégias de mitigação ao risco e, por conseguinte, subsidiar o processo de criação do metamodelo de simulação: estoque de M6 no *Supplier* 1.2, estoque de M6 no *Supplier* 1.1, intervalo de distribuição de C3 pelo *Supplier* 1.2, capacidade do caminhão para distribuir C3 pelo *Supplier* 1.2 e capacidade de recebimento do M6 no *Supplier* 1.1. O metamodelo difere do modelo de simulação, pois ele é obtido a partir de suas saídas através de inúmeras formas, como por exemplo, métodos de regressão.

As variáveis de controle estão relacionadas às seguintes estratégias de mitigação: redundância de estoques (*buffer*) e flexibilidade, acréscimo de capacidades na função transporte (unidades) e programação do transporte (distribuição).

### 5.3. Gestão do risco logístico (MELHORAR)

Esta fase iniciou-se pelo projeto de um arranjo experimental para determinar as melhores configurações e possibilitar a construção do metamodelo de simulação a ser utilizado como função objetivo no modelo de otimização.

#### 5.3.1 Projeto e análise de cenários

Considerando as cinco variáveis de controle já mencionadas, um arranjo experimental fatorial completo  $2^k$  (onde “ $k$ ” é o número de variáveis de controle) foi desenvolvido com a ajuda do software MINITAB® para o modelo com ruptura no fluxo de M6. O Quadro 35 descreve os parâmetros aplicados para gerar o arranjo fatorial de dois níveis ( $2^k$ ).

Quadro 35 – Planejamento experimental para as estratégias de resposta

Variável	Produto	Membro	Notação	Nível baixo (-1)	Nível alto (+1)
Estoque inicial	M6	S1.2	$x_1$	80 Unidades	800 Unidades
Estoque inicial	M6	S1.1	$x_2$	480 Unidades	1.200 Unidades
Capacidade de distribuição	C3	S1.2	$x_3$	10 Unidades	90 Unidades
Intervalo de distribuição	C3	S1.2	$x_4$	A cada 0,75/hora	A cada 1/hora
Capacidade de recebimento	C3	S1.1	$x_5$	20 Unidades	60 Unidades

Fonte: Produção do próprio autor

Como o *Supplier* S1.2 combina os materiais M6 e C2, a mesma quantidade de *buffer* C2 no nível alto foi acrescentada ao componente. Foi criado um estoque adicional de 720 unidades em nível alto. O intervalo de distribuição foi reduzido de uma entrega por hora, para uma a cada 45 minutos. A capacidade de distribuição de C3 foi expandida para 90 unidades em nível alto. Um *buffer* de 720 unidades de M6 foi adicionado no *Supplier* S1.1. Além do modelo com ruptura, combinado com as estratégias de mitigação, mais um cenário foi introduzido, o caso básico. Logo, 33 experimentos foram projetados, sendo:  $2^5 = 32$  para  $k = 5$  variáveis em dois níveis, mais um cenário (caso básico).

Cada experimento representa um cenário. A Tabela 7 ilustra o significado de cada cenário. Os cenários foram obtidos via DOE, consideradas as justificativas mencionadas nesta tese. Todos os cenários foram planejados em dois níveis a partir de um arranjo fatorial completo. Os experimentos foram executados no *tool* “*Process Analyzer*” do software ARENA® em 30 réplicas, testando cada configuração e obtendo-se os resultados para o custo logístico total, risco de *stockout* e *fill-rate*.

Tabela 7 – Representação dos cenários

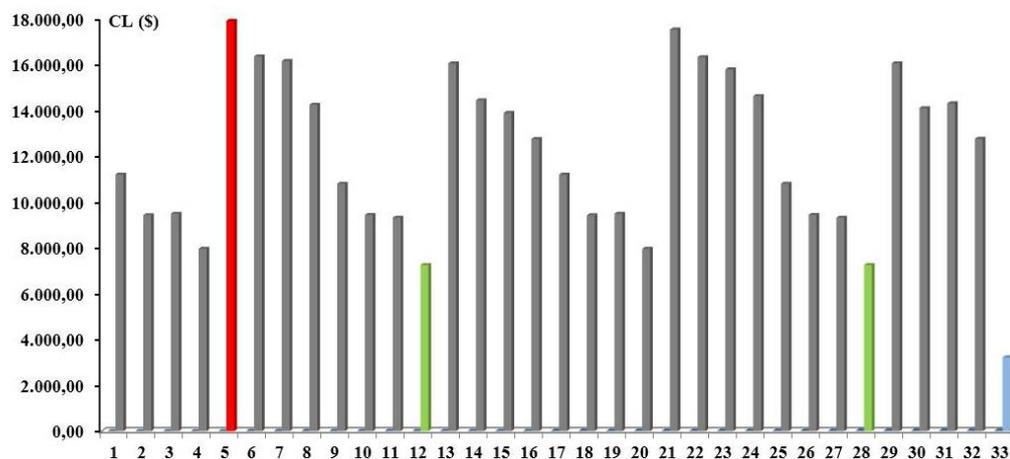
Cenário	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
01	80	480	10	0,75	20
02	800	480	10	0,75	20
03	80	1200	10	0,75	20
04	800	1200	10	0,75	20
05	80	480	90	0,75	20
06	800	480	90	0,75	20
07	80	1200	90	0,75	20
08	800	1200	90	0,75	20
09	80	480	10	1	20
10	800	480	10	1	20
11	80	1200	10	1	20
12	800	1200	10	1	20
13	80	480	90	1	20
14	800	480	90	1	20
15	80	1200	90	1	20
16	800	1200	90	1	20
17	80	480	10	0,75	60
18	800	480	10	0,75	60
19	80	1200	10	0,75	60
20	800	1200	10	0,75	60
21	80	480	90	0,75	60
22	800	480	90	0,75	60
23	80	1200	90	0,75	60
24	800	1200	90	0,75	60
25	80	480	10	1	60
26	800	480	10	1	60
27	80	1200	10	1	60
28	800	1200	10	1	60
29	80	480	90	1	60
30	800	480	90	1	60
31	80	1200	90	1	60
32	800	1200	90	1	60

**Nota:**  $x_1$  (Estoque inicial de M6 em S1.2),  $x_2$  (Estoque inicial de M6 em S1.1),  $x_3$  (Capacidade de distribuição de C3 em S1.2),  $x_4$  (Intervalo de distribuição de C3 em S1.2),  $x_5$  (Capacidade de recebimento de C3 em S1.1)

Fonte: Produção do próprio autor

Além das variáveis globais de resposta mencionadas, outras duas foram mensuradas: os custos logísticos dos *Suppliers* S1.1 e S1.2, buscando-se sinalizar os efeitos de ruptura nesses *players*, já que suas operações logísticas e de produção estão relacionadas com o material M6. Para as variáveis globais de respostas, respectivamente, as Figuras 39 - 41 apresentam os cenários executados nos experimentos, enfatizando o caso básico (*Base case*) – azul, o pior cenário (*Worst case*) – vermelho e o melhor cenário (*Best case*) – verde.

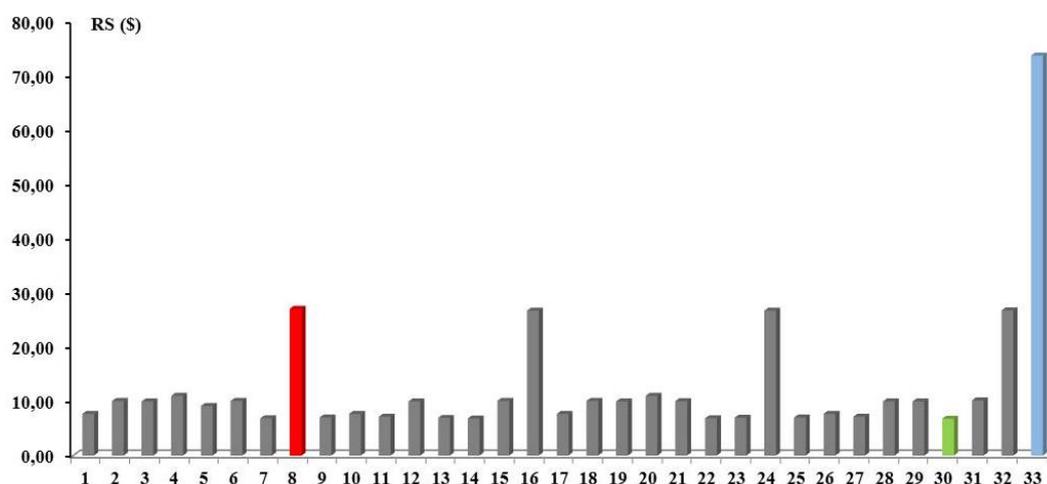
Figura 39 – Análise de cenário para o custo logístico total



Fonte: Produção do próprio autor

O custo logístico total passou de \$ 3.217,41 (caso básico) para \$ 17.898,92 do pior caso. Os cenários de mitigação 12 e 28 reduziram esse elevado custo para \$ 7.244,32. O aumento se dá basicamente pelo incremento da capacidade do caminhão para entregar o componente C3. Já a minimização do custo ocorre pelo acréscimo do *buffer* de M6 no *Supplier* S1.1.

Figura 40 – Análise de cenário para o risco total de *stockout*

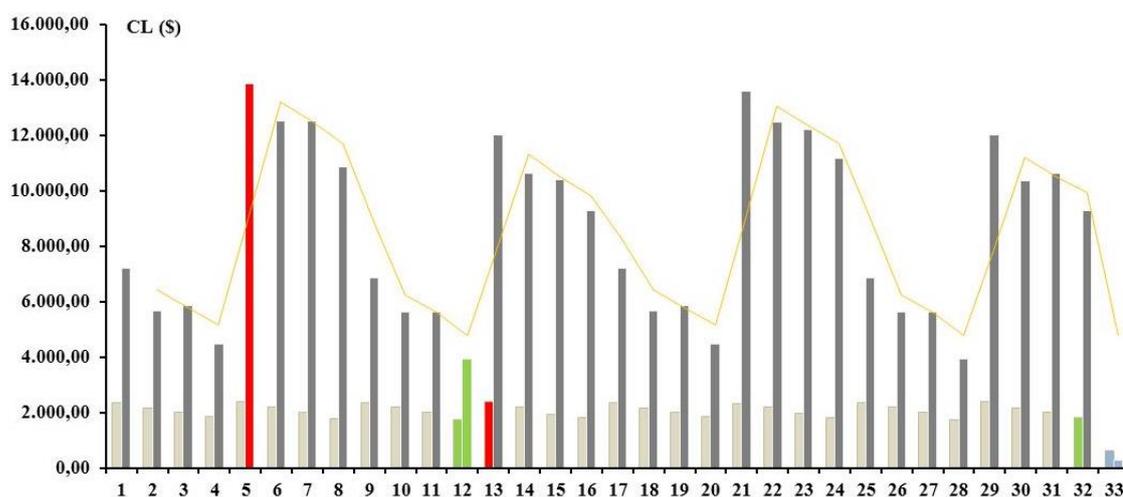


Fonte: Produção do próprio autor

Segundo Figura 40, o pior cenário do risco de *stockout* total ocorre no experimento 8, com \$ 27,03. Isso ocorre devido ao incremento de estoques, aumento na capacidade de transporte de C3. Todavia, o fluxo é pressionado pela baixa capacidade no suprimento (recepção) de C3 no *Supplier* S1.1. O melhor cenário de risco foi o 30, resultando em \$ 6,77. No entanto, o caso base resultou no maior risco de *stockout*, responsável por \$ 73,68.

Apesar de o modelo base ter obtido ótimas respostas em termos de custo logístico total e taxa de *fill-rate*, respectivamente, \$ 3.217,41 e 100%, algumas razões explicam essa intensidade: (a) os níveis de estoque dos componentes C2 e M6 no *Supplier* S1.2, projetados para apenas um dia; a estratégia de *just-in-sequence* (suprimento sequencial) e *just-in-time* (produção e distribuição enxutas); limitações devido à falta de informação na programação da distribuição dos insumos e componentes. No caso básico, como mencionado, buscou-se atender algumas premissas estabelecidas em Carvalho et al. (2012), por exemplo, a manutenção de estoques de segurança e as taxas *fill-rates* para o atendimento da montadora. A Figura 41 ilustra o efeito das estratégias de mitigação sobre custo logístico dos *Suppliers* S1.1 (marrom) e S1.2 (cinza).

Figura 41 – Análise de cenário para o custo logístico nos *Suppliers* S1.1 e S1.2



Fonte: Produção do próprio autor

Como se observa na Figura 41, as respostas são mais sensíveis no membro S1.2, já que ele produz, movimenta, armazena e distribui um volume relevante comparado ao membro S1.1. Nos *Suppliers* 1.2 e 1.1 o custo logístico se eleva muito, respectivamente, pelo aumento de capacidade no caminhão que distribui o componente C3 (cenário 5) e pela baixa capacidade de recebimento desse componente (cenário 13), o que acaba restringindo a entrada do material no estoque. O cenário 12 apresenta os melhores efeitos de mitigação para ambos os *Suppliers*. A linha laranja sobre o custo logístico do membro S1.2 mostra a média móvel definida para dois períodos, suavizando o comportamento dessa resposta. A taxa *fill-rate* do componente SA1 foi medida, já que ele é produzido a partir do componente C3, que, por conseguinte, depende dos materiais C2 e M6, esse último objeto da ruptura.

O *Supplier* 1.1 abastece SA1 diretamente à montadora. Vários cenários (1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29) resultaram nas piores taxas de entrega, equivalendo a 21,82%. No entanto, a partir das melhores combinações de estratégias, cenários 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 e 32, a taxa *fill-rate* de SA1 foi elevada a 54,55%. A elevação se deu por conta da adição dos estoques de M6 nos fornecedores S1.1 e S1.2. As demais variáveis, como capacidade do caminhão, intervalo entre as entregas e capacidade de recebimento, não afetaram o nível de serviço mais alto. A Tabela 8 mostra uma síntese dos cenários e os seus respectivos parâmetros nas três situações: melhor caso, pior caso e o caso base.

Tabela 8 – Síntese de cenários e parâmetros

Respostas	Custo logístico			Risco de <i>Stockout</i>			<i>Fill-rate</i> SA1		
	Pior	Base	Melhor	Pior	Base	Melhor	Pior	Base	Melhor
Cenário	5	33	12	8	33	30	1	33	4
$x_1$	80	80	800	800	80	800	80	80	800
$x_2$	480	480	1200	1200	480	480	480	480	1200
$x_3$	90	10	10	90	10	90	10	10	10
$x_4$	0,75	1	1	0,75	1	1	0,75	1	0,75
$x_5$	20	20	20	20	20	60	20	20	20

Fonte: Produção do próprio autor

Considerando a natureza estocástica do risco de transporte de M6 e o relevante número de variáveis no sistema, não se obteve um cenário que atendesse aos três objetivos, minimizando o custo total e o risco e maximizando a taxa de entrega de SA1. Abordagens fundamentadas em metamodelos de simulação podem ser importantes para avaliar que variáveis de controle e suas interações são mais críticas para incluir no modelo de otimização. Assim, os métodos de otimização contribuem para balancear multi-objetivos a partir de relações chave entre as relevantes variáveis de controle. Na próxima seção, os procedimentos de metamodelagem incluem a aplicação da Análise de Variância (ANOVA) para determinar quais variáveis são mais críticas para melhorar o desempenho das respostas.

A aplicação do projeto de experimentos é vantajosa. No entanto, para o arranjo de cenários gerado, o método testa apenas os limites máximos e mínimos das variáveis de controle, sem garantir que os cenários sugeridos forneçam os parâmetros mais adequados, ou próximos da região de interesse. Por outro lado, a análise experimental permite testar várias combinações de estratégias de mitigação, economizando tempo e custo se cada configuração de parâmetros fosse testada uma por vez.

### 5.3.2 O metamodelo de simulação

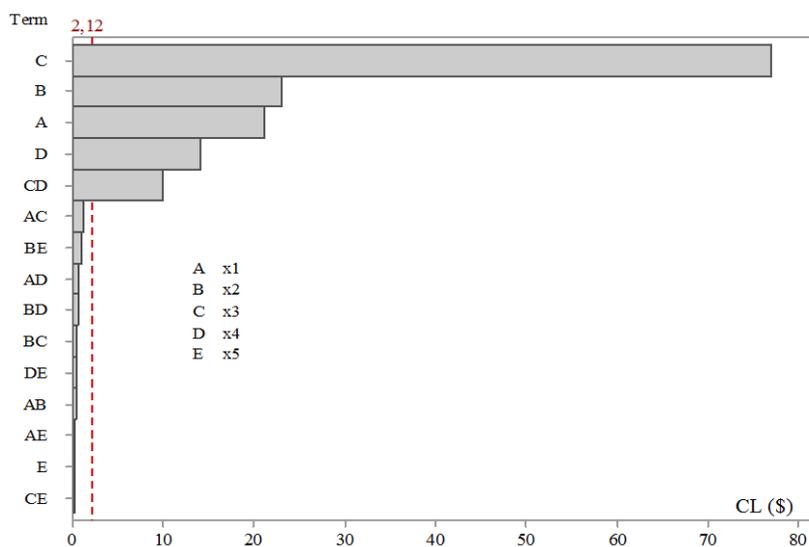
A partir da avaliação experimental, auxiliada pelo software MINITAB<sup>®</sup>, procedeu-se a uma análise fatorial para cada variável de resposta em função dos seus previsores (variáveis de controle) com três finalidades: (a) determinar as variáveis-chave de controle e suas interações; (b) avaliar os efeitos das interações sobre as variáveis de resposta; (c) elaborar o metamodelo de simulação. A análise fatorial foi realizada com a ajuda das ferramentas ANOVA, gráfico de Pareto, análise do P-valor e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Esses e outros critérios foram utilizados para validar o metamodelo.

A quantidade de variáveis de controle, no caso cinco, é proporcional ao número de interações, do modelo. Quanto maior o número de interações avaliadas entre as variáveis, mais complexo se torna o modelo. Quanto maior o número de ordens do modelo, maior a sua complexidade. Ou seja, a quantidade de termos não lineares, tais como quadráticos e cúbicos, torna o modelo mais difícil de ser manejado. Todavia, a série de Taylor ilustra que, truncando o modelo até os termos de segunda ordem, é o suficiente para manter sua representação e seu poder.

Para a resposta custo logístico, observou-se, segundo dados da ANOVA, que o modelo geral é significativo, já que o P-valor  $< 0,005$ . As variáveis de controle, vistas individualmente, para o modelo linear também são significativas. A mesma conclusão foi obtida para o modelo com duas interações. Todavia, apenas a interação entre a capacidade do caminhão e o intervalo de distribuição é representativa a um nível de significância de 5%. Portanto, as demais interações foram desprezadas no metamodelo, tornando-o mais simples.

A Figura 42 comprova essas análises a partir do gráfico de Pareto, que ilustra as interações mais significantes a partir do método de Lenth (1989) e os efeitos não padronizados. A linha pontilhada é usada como referência para definir os efeitos padronizados mais significativos.

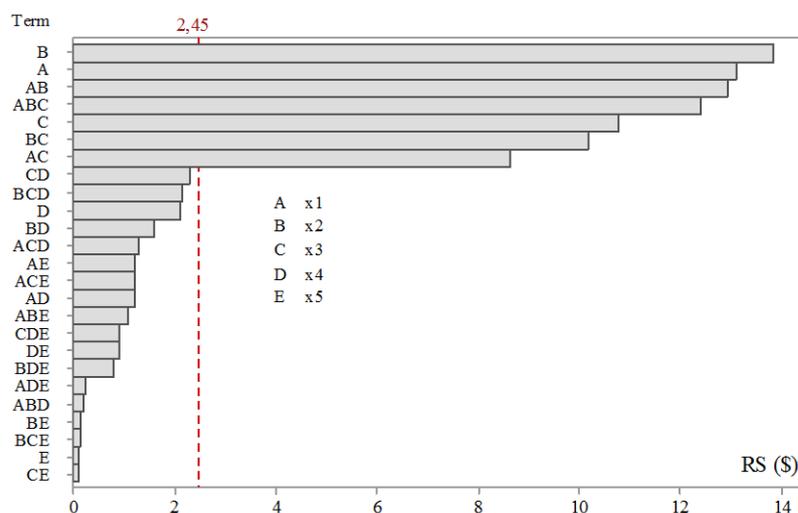
Figura 42 – Termos significativos para o custo logístico total



Fonte: Produção do próprio autor

Os mesmos procedimentos foram realizados para o efeito risco de *stockout*. Entretanto, as interações (*three way*) entre três variáveis de controle foram consideradas, tornando o modelo mais robusto e significativo. A um nível de significância de 5% todos os termos do modelo linear, com exceção de  $x_5$  (capacidade de suprimentos de C3 em S1.1) foram considerados significativos. O modelo para duas interações é significativo para as interações  $x_1$  (estoque inicial de M6 em S1.2) e  $x_2$  (estoque inicial de M6 em S1.1),  $x_1$  (estoque inicial de M6 em S1.2) e  $x_3$  (capacidade de distribuição de C3 em S 1.2), e  $x_2$  (estoque inicial de M6 em S1.1) e  $x_3$  (capacidade de distribuição de C3 em S 1.2). Já para três interações, apenas a relação  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  é relevante, como mostra o gráfico de Pareto na Figura 43.

Figura 43 – Termos significativos para o risco de *stockout*



Fonte: Produção do próprio autor

A taxa *fill-rate* não foi modelada devido ao erro padrão resultante ser zero e ao problema de multicolinearidade. Isso é explicado pelos valores das respostas não variarem. Apenas quatro valores diferentes para o *fill-rate* SA1 foram observados nos 32 experimentos. Assim, os metamodelos foram construídos com base nos indicadores de resposta custo logístico total e risco de *stockout*. Contudo, os pressupostos sobre o *fill-rate* foram adicionados ao modelo de otimização.

Para facilitar o processo de metamodelagem, apenas os termos significantes foram mantidos, tanto no modelo linear, como nos de segunda e terceira interações. Os metamodelos foram obtidos via módulo de regressão executado na ferramenta de análise experimental no software MINITAB®. Nesse sentido, foi utilizado um modelo de regressão linear múltipla para elaborar o metamodelo (Equação 6). O método dos mínimos quadrados ordinários (OLS) foi utilizado para desenvolver os metamodelos, para as funções risco de *stockout* e custo logístico:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \varepsilon \quad (6)$$

**Onde:**

$\hat{y}$  é a variável de resposta;

$x_i$  é a variável de controle, constante e conhecida;

$\beta_0$  é o intercepto ou constante;

$\beta_i$  é o parâmetro (coeficiente) de regressão;

$\varepsilon_i$  são os erros do modelo;

$k$  e  $j$  são os termos de interação do modelo

O modelo geral da Equação 6 pode ser expandido para considerar as interações entre duas ou mais variáveis de controle, conforme Equação 7. Nesse sentido, cada  $x$  pode ser multiplicado por um ou mais  $x$  para representar as interações entre os previsores:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j}^k \sum \beta_{ij} x_{ij} + \varepsilon \quad (7)$$

A partir da análise experimental dos resultados obtidos via simulação, o modelo de regressão geral para a variável do custo logístico total apresentou 16 termos para duas interações. Já para o risco de *stockout* o modelo regressivo abrangeu 26 termos para três interações. Essa quantidade de termos para ambas as variáveis ainda é complexa, mesmo os modelos sendo lineares. A questão é: esses modelos podem ser simplificados para manter a significância estatística entre as variáveis de controle e as respostas?

Os procedimentos de metamodelagem foram utilizados com o auxílio da ferramenta ANOVA para simplificar os modelos de regressão a partir do método OLS. A Tabela 9 demonstra os resultados da metamodelagem para o custo logístico total.

Tabela 9 – Parâmetros do metamodelo para o custo logístico total

Termos <sup>1</sup>	Contribuição %	CC	IC para 95%	Teste-t	VIF	CNC
Constante	-	12.276,30	[12.208,70; 12.343,80]	373,57	-	12.088,00
$x_1$	6,13	-798,20	[-865,70; -730,60]	-24,29	1,00	2,2171
$x_2$	7,33	-872,60	[-940,20; -805,10]	-26,55	1,00	2,4240
$x_3$	82,15	2.921,70	[2.854,20; 2989,20]	88,91	1,00	138,89
$x_4$	2,75	-534,80	[-604,40; -467,30]	-16,28	1,00	516
$x_3*x_4$	1,36	-376,20	[-443,80; -308,70]	-11,45	1,00	75,25

<sup>1</sup> P-valor<0,05; CC: Coeficientes codificados; IC: Intervalo de confiança; VIF: Inflação da variância; CNC: Coeficientes não codificados

Fonte: Produção do próprio autor

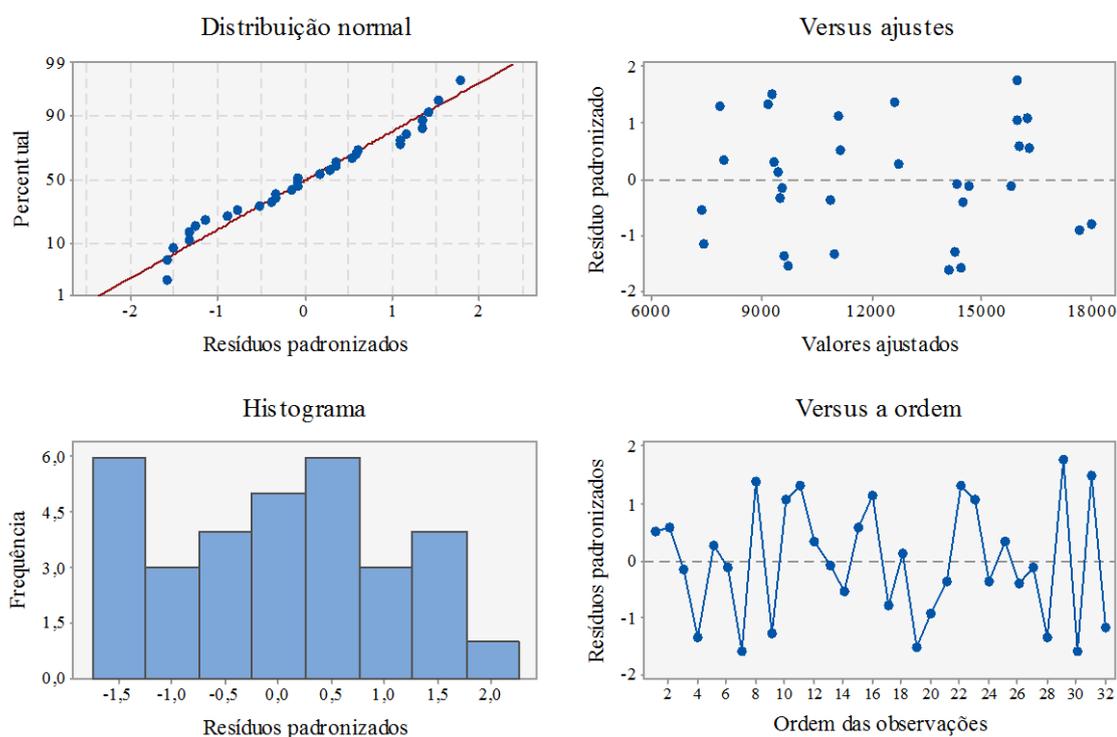
De acordo com a ANOVA, a variável  $x_3$  (capacidade do caminhão C3) mais contribui para explicar o custo logístico total, com 82,15%. Já as interações entre  $x_4$  (capacidade de recepção de C3 no *Supplier* S1.1) e  $x_3$  não é tão significativa. A terceira coluna mostra os coeficientes codificados do modelo de regressão. Já a quarta coluna mostra, com 95% de confiança, que o intervalo contém o verdadeiro valor do coeficiente. Os valores do teste-t de *Student* estão na coluna 5. O índice VIF mensura a inflação de variância estimada pelos coeficientes do modelo de regressão. Um VIF de 1,00 mostra que os previsores não estão correlacionados. A última coluna mostra os coeficientes não codificados, sendo, em ordem:  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$  e  $\beta_{34}$ . Esses termos foram usados para validar o modelo de regressão e estimar os valores projetados para o custo total logístico. Deste modo, o modelo de regressão foi reduzido de 16 para 6 termos. O valor esperado pelo metamodelo de regressão é dado pela Equação 8:

$$E\hat{y}(\mathbf{x}) = 12.088 - 2,2171x_1 - 2,4240x_2 + 138,89x_3 - 516x_4 - 75,25x_3x_4 + \varepsilon \quad (8)$$

Diversas técnicas foram utilizadas para validar o modelo de regressão. A primeira delas foi o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que avalia o quão as variáveis de controle ou previsores explicam a variável de resposta (MONTGOMERY; RUNGER, 2014). Este indicador mede entre 0 e 1 em escala percentual. Bons valores de  $R^2$  superam 70%. O valor de  $R^2$  obtido do modelo de regressão foi 99,73%. Assim sendo, as variáveis de controle explicam 99,73% da variação no custo logístico, sendo um excelente valor. O valor ajustado de  $R^2$  explica o % de variação na resposta para o número de previsores.

Para o custo logístico, o valor ajustado foi muito bom (99,68%). O coeficiente mede  $R^2$  (pred) mede o poder do modelo em prever respostas para novas observações, estimado em 99,59% para o custo logístico. Outro relevante indicador de validação foi o P-valor para o modelo e para os termos. Todos foram menores que o menor nível de significância (5%), resultando em P-valores = 0,0000. Os testes de resíduos medem a capacidade do modelo de se ajustar bem aos previsores a partir da soma das diferenças entre o valor real do conjunto e o valor ajustado pela regressão. A Figura 44 ilustra a análise residual padronizada do metamodelo.

Figura 44 – Análise residual para o custo logístico total



Fonte: Produção do próprio autor

O histograma mostra que os resíduos padronizados estão bem distribuídos. O gráfico à direita mostra os resíduos na ordem de execução dos experimentos. Parece que os resíduos no gráfico são independentes e aleatórios. Os resíduos versus ajustes também parecem ser aleatórios e ter variância constante. Já o gráfico localizado no canto superior esquerdo da Figura 44 mostra que os dados estão normalmente distribuídos em torno da linha vermelha. Para confirmar a hipótese de normalidade dos resíduos, esses foram armazenados e testados quanto ao seu ajuste à distribuição normal. Como o teste de hipótese resultou em um P-valor de 0,345 ou 34,5%, não existem fortes evidências para afirmar que os resíduos não se ajustam a uma distribuição normal.

Para finalizar a etapa de validação do modelo de regressão para o custo logístico, alguns testes de hipótese foram realizados (*t-Student*, teste-t pareado e teste para variância) entre as saídas do modelo de simulação e as respostas previstas pela equação de regressão com a finalidade de verificar se havia diferenças entre os conjuntos de dados.

Inicialmente os valores projetados pelo metamodelo foram calculados a um nível de confiança de 95% e em seguida armazenados. Os valores previstos incluíram os previsores significativos dos 32 cenários. Para cada um dos cenários, os intervalos de confiança e de previsão foram estimados. Por exemplo, para o cenário 1, com previsores de 80 ( $x_1$ ), 480 ( $x_2$ ), 10 ( $x_3$ ) e 0,75 ( $x_4$ ), a saída do modelo de simulação produziu um custo de \$ 11.194,57. O valor ajustado para o metamodelo foi de \$ 11.184,00 e o intervalo de confiança foi de \$ [11.018,50; 11.349,40]. Portanto, pode-se afirmar com 95% de probabilidade de que o intervalo de previsão entre \$ [10.767,60; 11.600,40] contém o verdadeiro valor previsto pelo metamodelo. Este passo foi aplicado aos demais cenários. Os testes demonstraram que não há evidência suficiente para concluir que os conjuntos produzem saídas diferentes. Por exemplo, para o teste de variância, o P-valor obtido (0,571) foi maior que o menor nível de significância (0,005). A Tabela 10 mostra os resultados da metamodelagem para o risco de *stockout* obtidos a partir dos mesmos procedimentos usados para o custo logístico total.

Tabela 10 – Parâmetros do metamodelo para o risco de *stockout*

Termos <sup>1</sup>	Contribuição %	CC	IC para 95%	Teste-t	VIF	CNC
Constante	-	10,889	[10,421; 11,358]	47,96	-	5,78
$x_1$	17,01	2,546	[2,078; 3,015]	11,21	1,00	0,00452000
$x_2$	18,94	2,687	[2,218; 3,155]	11,83	1,00	0,00231
$x_3$	11,47	2,091	[1,622; 2,559]	9,21	1,00	0,0576
$x_1*x_2$	16,50	2,508	[2,039; 2,976]	11,04	1,00	0,000004
$x_1*x_3$	7,36	1,675	[1,206; 2,144]	7,38	1,00	0,000274
$x_2*x_3$	10,24	1,976	[1,507; 2,444]	8,70	1,00	0,000067
$x_1*x_2*x_3$	15,22	2,409	[1,940; 2,877]	10,61	1,00	0,000001

<sup>1</sup> P-valor<0,05; CC: Coeficientes codificados; IC: Intervalo de confiança; VIF: Inflação da variância; CNC: Coeficientes não codificados

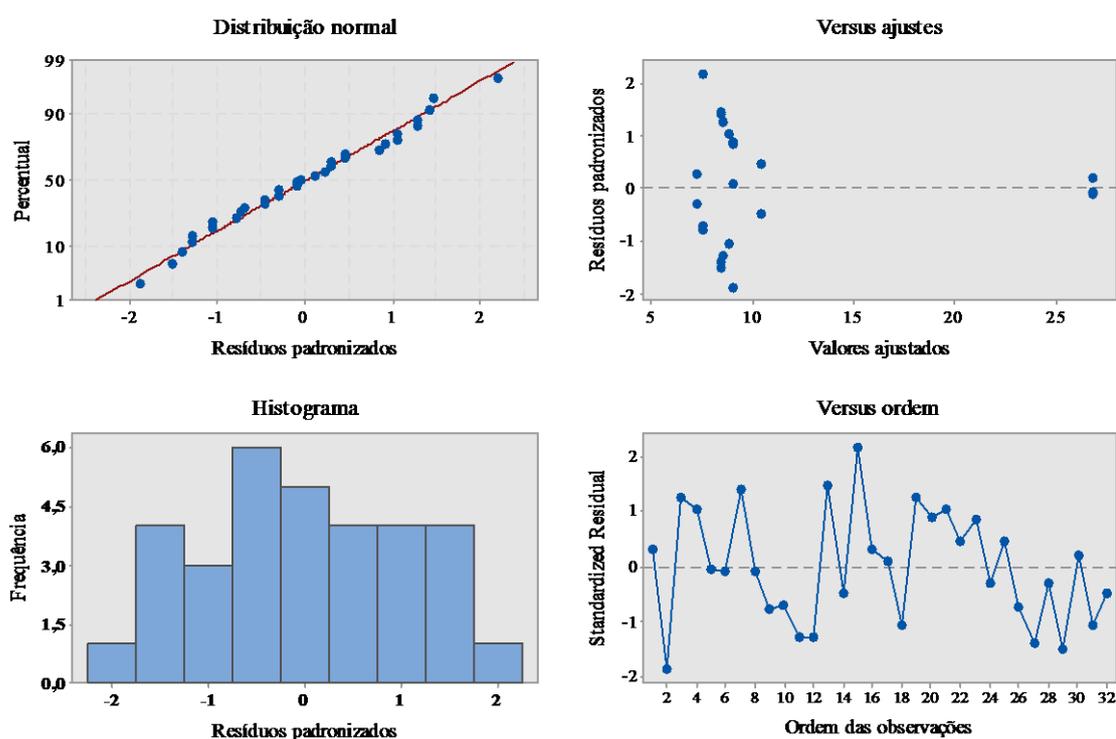
Fonte: Produção do próprio autor

O estoque de M6 no *Supplier* S1.1 ( $x_2$ ) tem a maior contribuição percentual para explicar o risco de *stockout*. Os intervalos de confiança contêm o verdadeiro valor dos coeficientes codificados. O VIF mostra que as variáveis de entrada não estão correlacionadas. Já a última coluna inclui os coeficientes utilizados para estimar as respostas sobre o risco de *stockout*. O metamodelo original de regressão passou de 26 para 8 termos, conforme Equação 9:

$$E\hat{y}(\mathbf{x}) = 5,78 + 0,00453x_1 + 0,00231x_2 + 0,0576x_3 - 0,000004x_1x_2 - 0,000274x_1x_3 - 0,000067x_2x_3 + 0,000001x_1x_2x_3 + \varepsilon \quad (9)$$

O metamodelo para o risco de *stockout* é válido segundo os coeficientes de determinação obtidos, como um  $R^2$  de 96,75%, um  $R^2$  ajustado de 95,81% e um  $R^2$  (pred) de 94,23%. Todos os P-valores, para termos e modelo, foram menor que nível de significância (5%). A Figura 43 ilustra gráficos que mostram a distribuição dos resíduos padronizados para a variável em análise.

Figura 45 – Análise residual para o risco de *stockout*



Fonte: Produção do próprio autor

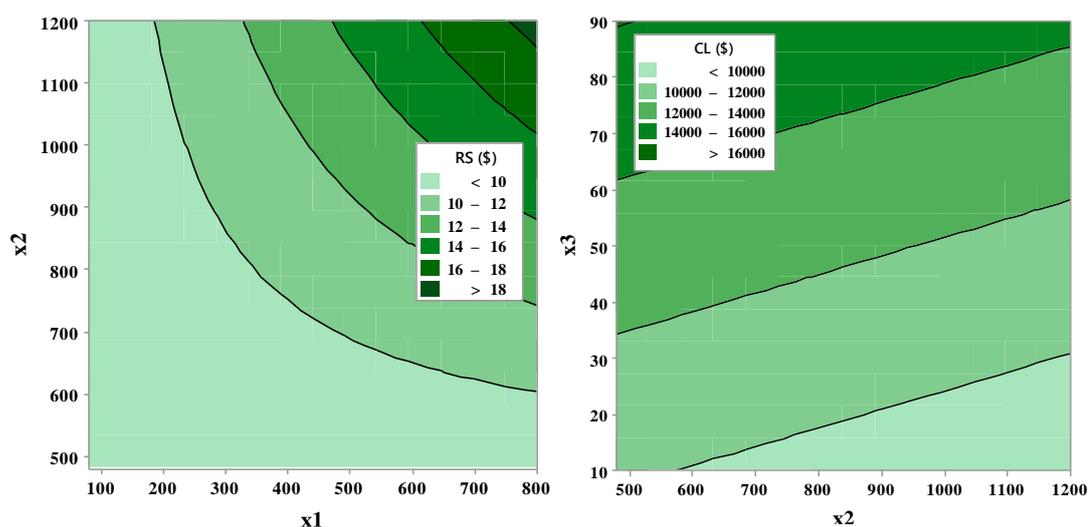
Os resíduos parecem ser independentes e normalmente distribuídos, apesar dos possíveis *outliers* identificados no gráfico dos valores ajustados versus resíduos (superior direito). Não há forte evidência para refutar a hipótese de que os resíduos não se ajustem a uma distribuição normal, já que os resíduos armazenados, tanto padronizados, como normais, apresentam um P-valor de 81,53% e, portanto, maior que o nível de significância de 5%. Os valores do risco de *stockout* previstos para o cenário 1, sendo  $x_1 = 80$ ,  $x_2 = 480$ ,  $x_3 = 10$  e  $x_4 = 20$ , foram estimados em \$ 7,315 a um intervalo de confiança (95%) de \$ [5,9895; 8,6405] contra \$ 7,65, resultante do modelo de simulação. Deste modo, há uma chance de 95% de que o intervalo de previsão \$ [4,3512; 10,2788] contenha o valor previsto pelo metamodelo.

Por fim, a partir dos testes de hipóteses, não existe forte evidência para afirmar que ambos os modelos, metamodelo e de simulação, apresentam saídas diferentes. Isso pode ser atestado pelos testes de variância de Bonett e Levene, respectivamente com P-valor de 0,961 e 0,695. A próxima sequência apresenta os procedimentos para o desenvolvimento da otimização a partir do metamodelo de simulação (Equações 8 e 9).

### 5.3.3 O modelo de otimização

Antes de iniciar a modelagem do problema de otimização, gráficos de contornos para o custo logístico e risco de *stockout* foram plotados para analisar possíveis regiões de solução e ajudar a configurar os parâmetros de entrada no modelo de simulação, conforme mostra a Figura 46.

Figura 46 – Gráficos de contorno para as variáveis de resposta

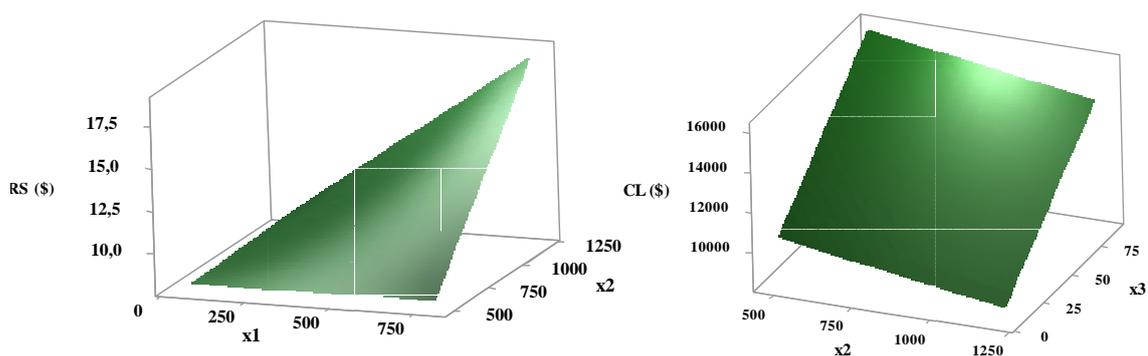


Fonte: Produção do próprio autor

Os gráficos de contorno são plotados para as principais variáveis de controle que influenciam a resposta. Para o gráfico risco de *stockout*, a inserção de *buffers* de M6 nos *Suppliers* S1.2 e S1.1 tem maior impacto para a minimização desse risco logístico. A região verde-claro em **L** denota o espaço de busca dos parâmetros de  $x_1$  e  $x_2$  capazes de minimizar o risco abaixo de \$ 10,00. Já para o custo logístico, a região de viabilidade delimitada pelo triângulo isóscele, na cor verde-claro, aponta para um *buffer* de M6 variando entre 600 e 1200 unidades no *Supplier* S1.1 e uma capacidade estimada do caminhão para transporte de C3 entre 10 e 30 unidades para que se tenha um custo total abaixo de \$ 10,00. Todavia, deve-se considerar que essas regiões são válidas para cada resposta individual. Assim, a otimização multiobjetivo pode não encontrar soluções viáveis no espaço de busca que minimizem conjuntamente risco e custo.

A Figura 47 ilustra gráficos tridimensionais de superfície para as respostas versus previsores. As relações entre as variáveis de controle e os efeitos se estendem por planos lineares. Muito provavelmente há uma pequena curvatura no gráfico do risco de *stockout*. Entretanto, pontos axiais não foram adicionados aos experimentos para verificar a existência de relacionamentos curvilíneos.

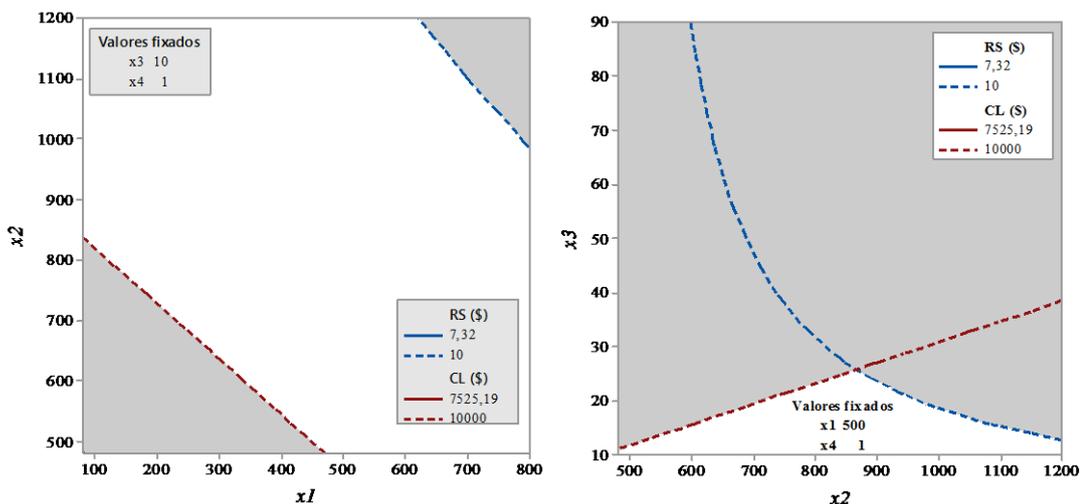
Figura 47 – Gráficos de superfície para as respostas



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 48 ilustra gráficos sobrepostos de contorno que foram ajustados para limitar a região de viabilidade e facilitar a modelagem da otimização. O gráfico à esquerda ilustra a região conjunta de localização dos valores das variáveis  $x_1$  e  $x_2$  que devem atender às condições de otimalidade. Para o risco de *stockout*, a região foi delimitada com base na resposta mínima projetada pelo metamodelo do risco (\$ 6,77) e o máximo definido pelo gráfico de contorno (Figura 47), que sugere índices de risco abaixo de \$ 10,00. Os limites mínimo e máximo foram determinados também para o custo logístico. A região na cor branca deverá conter os parâmetros adequados de  $x_1$  e  $x_2$  que minimizem o risco e o custo.

Figura 48 – Gráficos de contorno sobrepostos



Fonte: Produção do próprio autor

O problema de otimização é multiobjetivo, cuja finalidade é minimizar o custo logístico total e o risco de *stockout*, bem como maximizar a taxa *fill-rate*. Assim, o problema pode ser representado segundo Equações 10 e 11, respectivamente para a função objetivo e restrições:

$$\text{Minimizar } f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x) \quad (10)$$

$$\text{Sujeito a: } g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

Onde:

$n$  é o número de funções objetivo que devem ser minimizadas

$x$  é a variável de controle e inteira

$m$  é o número de restrições

Para modelar o problema de otimização, duas estratégias tradicionais de soluções podem ser usadas: aglutinação e priorização. Essas estratégias são aplicadas para tratar problemas que envolvam multiobjetivos de resposta. Nessa tese foi utilizada a técnica de priorização. Ou seja, decidiu-se por considerar a função risco de *stockout* como a função objetivo, sendo o metamodelo de custo logístico considerado como restrição. Portanto, o modelo de otimização é restrito, multidimensional, com desigualdade e interações, como mostra a modelagem nas Equações 12 – 18:

$$\text{Min}FC(\mathbf{x}) = 5,78 + 0,00453x_1 + 0,00231x_2 + 0,0576x_3 - 0,000004x_1x_2 - 0,000274x_1x_3 - 0,000067x_2x_3 + 0,000001x_1x_2x_3 \quad (12)$$

**Sujeito a:**

$$CL(\mathbf{x}) = 12,088 - 2,2171x_1 - 2,4240x_2 + 138,89x_3 - 516x_4 - 75,25x_3x_4 \leq 17,778,00 \quad (13)$$

$$80 \leq x_1 \leq 800 \quad (14)$$

$$480 \leq x_2 \leq 1200 \quad (15)$$

$$10 \leq x_3 \leq 90 \quad (16)$$

$$0,75 \leq x_4 \leq 1 \quad (17)$$

$$x_1 \geq 1, x_2 \geq 1, x_3 \geq 1, x_4 \geq 0,25, CL_x \geq 1 \quad (18)$$

Onde:

$x_1$  é Estoque inicial de M6 em S1.2

$x_2$  é Estoque inicial de M6 em S1.1

$x_3$  é Capacidade de distribuição de C3 em S1.2

$x_4$  é Intervalo de distribuição de C3 em S1.2

$x_5$  é Capacidade de recebimento de C3 em S1.1

Como mencionado, a ferramenta de planejamento de experimentos, usada para projetar um arranjo fatorial completo, tem a vantagem de combinar e sinalizar cenários que melhoram o desempenho da resposta em análise. Porém, os valores dos previsores para esse arranjo são testados nos valores mínimo e máximo. Valores intermediários não são executados.

O projeto experimental modelado via software permite desenvolver metamodelos, verificar quais variáveis mais afetam a resposta, analisar interações, determinar regiões de viabilidade e otimalidade, entre outros benefícios. Assim, essa ferramenta também potencializa sugestões de melhores cenários para as respostas. Por outro lado, os métodos de otimização podem ser mais precisos em sugerir alternativas de soluções mais adequadas, sejam ótimas ou próximas da região dos pontos de ótimos. A ideia é utilizar métodos de otimização, via metamodelo de simulação, para parametrizar o sistema logístico. Os metamodelos foram introduzidos como respostas no modelo de simulação com ruptura para facilitar a modelagem da otimização.

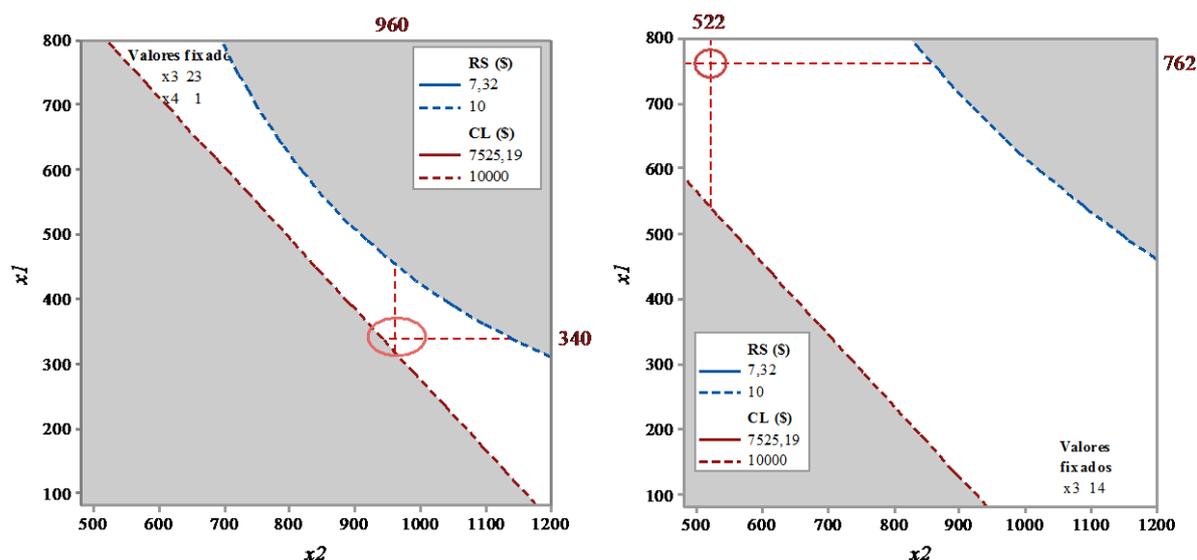
As restrições foram determinadas com base nas análises dos gráficos de contorno em torno da região experimental. O modelo de otimização ilustrado nas Equações 12 – 18 foi resolvido com o auxílio da ferramenta OptQuest<sup>®</sup>, que é um software embutido no programa ARENA<sup>®</sup> usado para otimizar a partir das variáveis de controle e de resposta fornecidas pelo modelo de simulação. Essa otimização é *Black Box*. Ou seja, a ferramenta é carregada com sete métodos: projeto de experimentos, *cross-entropia*, algoritmos genéticos, MILP, otimização enxame de partículas, perturbação simultânea com aproximação estocástica e enumeração completa.

A modelagem no software segue a mesma lógica antes mencionada nas equações, incluindo, a função objetivo, as variáveis de decisão, as variáveis de resposta, a matriz com as alternativas de soluções sugeridas e os parâmetros para execução do modelo de otimização. Assim sendo, o metamodelo e seus pressupostos, enunciados nas Equações 12 – 18, foram desenvolvidos no OptQuest<sup>®</sup>. O software executou 100 rodadas de simulação com três réplicas cada, para obter as melhores alternativas de soluções (parâmetros).

Sobre a mitigação dos efeitos de ruptura de fluxo na CS, a Figura 49 ilustra duas das soluções produzidas pelo modelo de otimização. A questão da inviabilidade de soluções contíguas para as respostas a partir das regiões adequadas para a minimização multiobjetivo foi identificada após a execução do modelo de otimização.

Ainda dentro do espaço experimental, a restrição da função custo logístico foi relaxada até o máximo valor estimado pelo metamodelo de simulação com a finalidade de se obter soluções balanceadas para o problema. As respostas sugeridas pela otimização multiobjetivo foram testadas uma a uma para verificar aquelas mais viáveis dentro da região do espaço de busca.

Figura 49 – Parametrização das variáveis de controle



Fonte: Produção do próprio autor

Os 100 cenários propostos pelo modelo de otimização foram testados quanto à sua viabilidade para mitigar os efeitos da ruptura física, buscando-se soluções que gerassem o risco abaixo de \$ 10,00 a um menor custo logístico do que o máximo valor obtido pelas projeções realizadas pelo metamodelo de simulação. O modelo de otimização foi estruturado como um MILP (Programação Linear Inteira Mista). A Tabela 11 mostra as dez configurações mais viáveis (melhores) para as variáveis mais significativas no metamodelo.

Tabela 11 – Configurações sugeridas pelo modelo de otimização

Solução/Variável	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
6	340	960	23	1
9	762	522	14	1
13	734	1.197	11	1
18	840	80	10	1
44	800	480	10	1
47	80	1.200	10	1
51	632	1.032	11	1
64	875	232	12	1
91	96	1.090	20	1
94	280	786	15	1

Fonte: Produção do próprio autor

Como descrita no modelo de otimização, a função objetivo foi baseada no metamodelo para o risco de *stockout*, estando o custo logístico como restrição limitada ao valor máximo que foi projetado pelo modelo reduzido de regressão. Para os dez cenários viáveis da Tabela 11, a otimização retornou um risco de \$ 8,31 e um custo logístico de \$ 14.372,16. Os valores obtidos não são o mínimo, nem o máximo daqueles projetados pelo metamodelo de regressão, respectivamente, \$ 7,32 e \$ 17.779,88. Isso pode ser explicado devido às previsões terem sido individualmente estimadas para cada resposta e para cada cenário.

O MILP busca uma solução balanceada entre as respostas e não necessariamente produz as melhores soluções para as regiões viáveis, próximas dos pontos de ótimos. Diferentemente dos cenários obtidos do projeto experimental, o modelo de otimização multiobjetivo busca soluções que atendam às condições de otimalidade dentro das restrições sobre as variáveis de controle. Comparando as soluções viáveis da otimização via metamodelo de simulação com as do modelo-base com inserção de ruptura, as estratégias de mitigação desenvolvidas a partir da otimização surtiram um bom efeito. A taxa *fill-rate* de SA1 passou de 10,91% para 52%, equivalente a 1.150 unidades entregues.

A adição de capacidades, *buffers* e estoques acabam por elevar o custo logístico total. Neste caso, o custo passou de \$ 11.317,82 para \$ 14.372,16. Ressalta-se que o modelo com ruptura é o caso base com inserção do evento do risco. Isso significa que esta versão foi criada próxima das condições ideais de operação da CS automotiva em termos de estoques, capacidades e políticas de revisões periódicas (produção, compras e distribuição) e outros aspectos. Essas condições resultaram em uma taxa *fill-rate* de 100% sobre os componentes distribuídos para a montadora. O pior cenário experimental gerou um risco de \$ 27,03, reduzido para \$ 8,31.

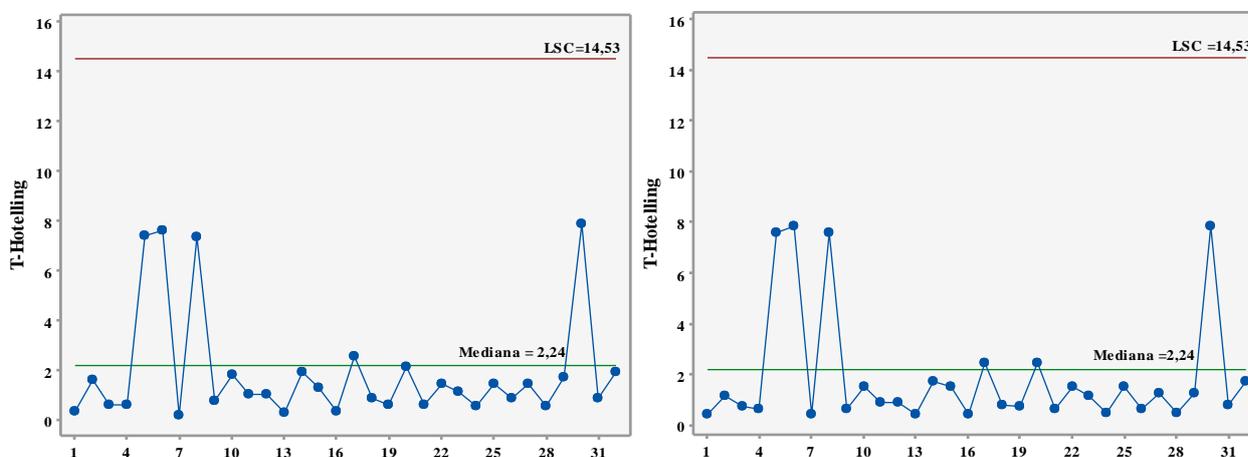
Para concluir essa seção, o planejamento de experimentos foi uma ferramenta que permitiu projetar os cenários e determinar aqueles capazes de minizar o risco e reduzir o seu custo. Assim, esta abordagem proporcionou bons resultados, além de contribuir para a elaboração do metamodelo de simulação a partir da avaliação de respostas de mitigação. Por exemplo, foi possível examinar quais variáveis e suas interações eram mais importantes para melhorar o desempenho dos KPIs, tornando o metamodelo mais parcimonioso e simples. Já o método de otimização mostrou-se adequado, gerando soluções para o problema multiobjetivo.

## 5.4. Monitoramento do risco logístico (CONTROLAR)

Diferentes ferramentas podem ser utilizadas para monitorar o desempenho das variáveis de resposta. Algumas delas foram aplicadas nesse trabalho de tese, como por exemplo, o painel de KPIs criado no modelo de simulação, histogramas, gráficos de barras, diagramas *Box-Plot* e de dispersão e gráficos de contornos e de superfície. Outras abordagens podem ser aplicadas no monitoramento e controle, tais como: cartas de controle, gráficos multivariados, efeitos principais, gráfico para análise de interações, gráficos multivariados EWMA, entre outros.

Nesta etapa o gráfico  $T^2$ -Hotelling foi aplicado para monitorar as duas respostas, risco e custo logístico total. Esse gráfico utiliza uma estatística qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para traçar os pontos e o limite de controle. Esta ferramenta apresenta vantagens como ter apenas um limite de controle para facilitar a interpretação e possibilitar o controle conjunto de duas ou mais variáveis. A Figura 50 mostra os gráficos  $T^2$ -Hotelling para o risco de *stockout* e custo logístico, tanto para o modelo com ruptura, como os metamodelos de simulação, respectivamente.

Figura 50 – Monitoramento do risco de *stockout* e custo logístico



Fonte: Produção do próprio autor

Além de apresentar elementos de controle, os gráficos da Figura 48 validam as saídas do modelo sob ruptura e do metamodelo de simulação. Observa-se que as estatísticas plotadas para os 32 cenários não ultrapassam os limites superiores de controle (LSC). Portanto, não há causas especiais ou problemas que possam provocar um desempenho inadequado entre os modelos e as variáveis de respostas produzidas por eles.

## 5.5. Conclusões do capítulo

Este capítulo compreendeu a aplicação dos procedimentos metodológicos iniciando-se pela etapa de identificação. Nesta fase, a partir do levantamento do problema, que foi determinar a configuração adequada do sistema logístico alvo de estudo, uma sucessão de atividades foi realizada. A CS objeto da pesquisa e suas operações logísticas foram configuradas a partir de ferramentas e *frameworks*, cuja finalidade foi desenvolver a modelagem conceitual, tanto relacionada à estrutura da CS e do sistema logístico, como aos riscos envolvidos.

Após a modelagem conceitual, o modelo computacional foi criado, incorporando a dinâmica da CS e das operações logísticas, os riscos e o SMD. As principais variáveis de desempenho analisadas foram o custo logístico total, o risco de *stockout* total e a taxa *fill-rate*. Um evento de risco logístico foi introduzido na CS e seus efeitos avaliados. Estratégias de mitigação para minimizar os impactos provocados pela ruptura no fluxo físico de distribuição foram testadas visando auxiliar na elaboração de um metamodelo de simulação desenvolvido a partir da análise de regressão linear múltipla baseada no método dos mínimos quadráticos ordinais.

Um modelo de otimização baseado no metamodelo de simulação foi estruturado a partir de uma programação não linear inteira mista (MILP) para fornecer as melhores soluções (como mostra a Tabela 10) visando mitigar as consequências do risco de transporte. As alternativas de soluções testadas (parametrizadas) no sistema logístico evidenciaram grandes melhorias no desempenho das variáveis de resposta contra os efeitos da ruptura no modelo de base. Por fim, gráficos T<sup>2</sup>-Hotelling foram usados para controlar o risco de *stockout* e custo logístico total.

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

---

### 6.1 Verificação dos objetivos e respostas às questões de pesquisa

A formação de CSs mais horizontalizadas traz consigo altos níveis de complexidade, tanto na sua estrutura operacional, quanto na formação e manutenção dos relacionamentos entre vários *players*, ainda mais no contexto cujo *mix* de componentes e produtos é relevante. O fenômeno da desindustrialização e a atuação das CSs em âmbito global podem tornar esses arranjos mais susceptíveis às vulnerabilidades provocadas por vários tipos de riscos. Além disso, fenômenos naturais ou provocados pelo homem, tais como: o furacão Florence ou o atentado terrorista de 11/09 em 2001, podem afetar às cadeias, causando rupturas nos fluxos físicos de produtos e insumos. Nesse sentido, as operações logísticas em CSs também poderiam ser impactadas, notadamente quando executadas por provedores de serviços.

As constatações mencionadas reforçam a importância de se ter mecanismos para gerenciar riscos no âmbito das cadeias. Este trabalho de tese teve como objetivo mitigar os efeitos de RLs em uma CS a partir da criação de um metamodelo de simulação para a otimização de parâmetros. Uma pesquisa aplicada foi utilizada a partir de dados secundários publicados no trabalho de Carvalho et al. (2012) sobre um estudo de caso realizado em uma montadora de carros localizada em Portugal. O objeto de análise focou nas operações do sistema logístico dessa cadeia de suprimentos. O método de pesquisa baseado na simulação foi escolhido como abordagem quantitativa para compreender a dinâmica dos RLs e seus efeitos críticos, além de fornecer os *inputs* necessários ao processo de modelagem. O metamodelo de regressão múltipla baseado no método OLS foi elaborado com auxílio de um projeto de experimentos testados no modelo de simulação. A combinação OvS foi obtida por meio de um metamodelo e assumiu uma perspectiva normativa. Os procedimentos metodológicos se fundamentaram em uma densa revisão exploratória de literatura.

Os principais resultados mostraram a importância de integrar os processos de modelagem, simulação e otimização para tornar o sistema logístico objeto de estudo mais resiliente aos eventos estocásticos de riscos que foram introduzidos, reduzindo os níveis de vulnerabilidades na CS automotiva. Os efeitos sobre o desempenho global da cadeia foram mensurados através do custo total logístico, do risco de *stockout* e da taxa *fill-rate* para atendimento dos pedidos, respondendo a primeira questão de pesquisa sobre os impactos dos RLs.

Estratégias de resposta ao risco logístico, como flexibilidade e redundância, foram testadas e simuladas para produzir um metamodelo usado como ponte para a otimização multiobjetivo. A otimização *Black Box*, estruturada com o auxílio do metamodelo de simulação e com o software OptQuest®, sugeriu configurações que foram reparametrizadas para comprovar os efeitos das estratégias de mitigação sob ruptura de fluxo e as vantagens no uso da proposta construída neste trabalho de tese. Portanto, os ajustes sugeridos pela otimização responderam à segunda questão de pesquisa. Ou seja, o sistema logístico foi ajustado para refletir melhorias na CS. Para finalizar, a combinação entre os métodos de simulação e otimização associada às estratégias de resposta ao risco, surtiram o efeito esperado em termos de mitigação dos efeitos adjacentes ao sistema logístico.

## 6.2 Contribuições da tese

Diversas contribuições foram desenvolvidas nesta pesquisa. A principal delas foi a elaboração de uma sistemática metodológica para gerenciar RLs em CSs. Os procedimentos sistemáticos se basearam em cinco fases: identificação, avaliação, gestão, monitoramento e comunicação. Essas etapas se apoiaram nos fundamentos do modelo DMAIC. A interface entre os modelos de simulação foi incorporada, respectivamente, nos estágios de avaliação e gestão dos RLs. A proposta objetiva melhorar o processo de gestão dos riscos a partir das potencialidades dos métodos de simulação e otimização quando cadeias estão vulneráveis às situações de rupturas, por exemplo. Esses procedimentos permitem testar, analisar e otimizar cenários para definir ajustes mais adequados do sistema logístico.

Esta pesquisa contribui para melhorar a aplicação dos mecanismos de mitigação a partir de métodos quantitativos e compreender a dinâmica dos riscos e impactos sobre a CS objeto de estudo. Outra contribuição foi elaborar um SMD com base no modelo SCOR® alinhado com KPIs e métricas de riscos. Os resultados obtidos, via sistemática metodológica, valem apenas para a realidade desse estudo de caso, não podendo ser extrapolados para outras aplicações. Entretanto, os procedimentos para a gestão de RLs podem ser implantados em ambientes de PSLs ou outras situações que envolvam CSs e sistemas logísticos. Um dos benefícios dessa tese é melhorar o processo de configuração de CSs e operações focadas no sistema logístico a partir de um encadeamento de *frameworks*, os quais permitiram capturar mais informações necessárias à modelagem e ao desenvolvimento do modelo de simulação.

Algumas limitações foram constatadas, como por exemplo, a perda de informações quando trasladadas do trabalho de Carvalho et al. (2012) para o modelo conceitual, já que alguns dos dados causaram dúvidas na interpretação desses *inputs*. A técnica de validação baseada na comparação de dados simulados com dados reais não foi utilizada, já que não foi possível ter acesso aos indicadores de desempenho. Simplificações e pressupostos foram introduzidos no modelo, como por exemplo, a não modelagem dos fluxos reversos e dos processos diretos da CS automotiva, a atribuição de custos de *stockout*, a falta de quantificação dos efeitos sobre a falta de material na montadora, entre outros.

Os métodos aplicados se mostraram interessantes para modelar o problema em questão. Os métodos gráficos (SIPOC, fluxograma e IDEF-SIM) foram bastante úteis para desenvolver a modelagem conceitual. O método de simulação a eventos discretos foi utilizado com sucesso para modelar o sistema logístico da CS objeto de estudo, apropriado para modelar sistemas muito complexos como esse. O método de planejamento de experimentos contribuiu para projetar os cenários e auxiliar na construção do metamodelo de simulação, desenvolvido a partir do método dos mínimos quadrados OLS, o qual foi adequado para a situação. Por fim, o problema de otimização foi bem estruturado a partir do método MILP e resolvido através da otimização *Black Box* realizada pelo suplemento OptQuest® embutido no software ARENA®.

### **6.3 Sugestões para pesquisa futuras**

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se integrar à sistemática metodológica proposta, outras medidas de riscos, como CVaR e métodos de otimização, tais como o NBI. Outros desdobramentos apontam para o uso de redes bayesianas para modelar problemas de riscos logísticos; a interface *online* e *ontime* entre a simulação e otimização; ou envolvimento de tópicos como *blockchain*, indústria 4.0 e temas afins, comportamentos interativos e sociais, entre outros.

## REFERÊNCIAS

- ABDELKAFI, C. et al. Balancing risk and costs to optimize the clinical supply chain - A step beyond simulation. **Journal of Pharmaceutical Innovation**, v. 4, n. 3, p. 96–106, 2009.
- ABERDEEN GROUP REPORT. **Supply Chain Risk Management: Building a Resilient Global Supply Chain**, July 2008.
- ADHITYA, A.; SRINIVASAN, R.; Dynamic simulation and decision support for multisite specialty chemicals supply chain, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 20, 91-9931, 2010.
- ADHITYA, A.; SRINIVASAN, R.; KARIMI, I. A. Supply chain risk identification using a HAZOP-based approach, **AIChE Journal**, v. 55, n. 6, p. 1447-1463, 2009.
- AFSHAR-BAKESHLOO, M. et al. A multi-objective Environmental Hedging Point Policy with customer satisfaction criteria, **Jornal of Cleaner Production**, v. 179, 2018, p. 478-494, 2018.
- AGARWAL, A.; SHANKAR, R.; TIWARI, M. K. Modeling the metrics of lean, agile and leagile supply chain: An ANP-based approach, **European Journal of Operational Research**, v. 173, p. 211-225, 2006.
- AKBARI, A. A.; KARIMI, B. A new robust optimization approach for integrated multi-echelon, multi-product, multi-period supply chain network design under process uncertainty, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 2015, n. 79, p.229 -244, 2015.
- ALBINO, V.; CARBONARA, N.; GIANNOCCARO, I. Supply chain cooperation in industrial districts: a simulation analysis, **European Journal Operation Research**. v. 177, n. 1, p. 261-280, 2007.
- ALMEDER, C.; PREUSSER, M.; HARTL, R. Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches? **OR Spectrum**, v. 2009, n. 31, p. 95 – 119, 2009.
- ALOINI, D. et al. Supply chain management: a review of implementation risks in the construction industry, **Business Process Management Journal**, vol. 18, n. 5, p. 735–761, 2012.
- ALTIOK. T.; MELAMED, B. **Simulation modeling and analysis with Arena**. 1º ed. San Diego: Academic Press; 2007.
- AMINI, M. et al. Alternative supply chain production–sales policies for new product diffusion: an agent-based modeling and simulation approach, **European Journal Operation Research**, v. 216, n. 2, p. 301-311, 2012.
- ANDERSON, D. L.; BRITT, F. E.; FAVRE, D. J. **The seven principles of supply chain management**, 2000. Acesso em 15 de Janeiro de 2014. Disponível no seguinte endereço eletrônico: <http://www.manufacturing.net/magazine/logistic/archives/1997/scmr/11princ.htm>.
- APPELQVIST, P.; LEHTONEN, J.; KOKKONEN, J. Modelling in product and supply chain design: literature survey and case study, **Journal of Manufacturing Technology Management**; vol. 15, n. 7, p.675-686, 2004.
- APPLEQUIST, G. E.; PEKKNY, J. F.; REKLAITIS, G. V. Risk and uncertainty in managing chemical manufacturing supply chains, **Computers & Chemical Engineering**, v. 24, p. 2211-2222, 2000.
- APICS. **Supply Chain Operations Reference Model (SCOR)**, Versão 12.0. 2017.
- AQLAN, F.; LAM, S. S. A Fuzzy-based integrated framework for supply chain risk assessment, **International Journal of Production Economics**, v. 161, p. 54–63, 2015a.
- AQLAN, F.; LAM, S. S. Supply chain risk modelling and mitigation, **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 18, p. 5640–5656, 2015b.
- AQLAN, F. A software application for rapid risk assessment in integrated supply chains, **Expert Systems with Applications**, v. 43, p. 109–116, 2016.
- ARCELUS, F. J.; PAKKALA, T. P. M.; SRINIVASAN, G. A purchasing framework for B2B pricing decisions and risk-sharing in Supply Chains, **Decision Sciences**, v. 33, n. 4, p. 645–672, 2002.
- ARMSTRONG & ASSOCIATES. **Global 3PL Market Size Estimates. 2018. Disponível em:** <https://www.3plogistics.com>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2019.

- ASHAYERI, J.; LEMMES, L. Economic value added of supply chain demand planning: a system dynamics simulation. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 22, n. 5-6, p. 550-556, 2006.
- ASLAM, T.; NG, A. H. C. Combining system dynamics and multi-objective optimization with design space reduction, **Industrial Management & Data Systems**, vol. 116, n. 2, p.291-321, 2016.
- AVCI, M. G.; SELIM, H. A Multi-objective, simulation-based optimization framework for supply chains with premium freights, **Expert Systems With Applications**, v. 67, n. 2017, p. 95 – 106, 2017.
- AZAD, N. et al. A new model to mitigating random disruption risks of facility and transportation in supply chain network design, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 2014, n. 70, p. 1757 – 1774, 2014.
- AZADEH, A.; ALEMM, S. M. A flexible deterministic, stochastic and fuzzy Data Envelopment Analysis approach for supply chain risk and vendor selection problem: simulation analysis, **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 12, p. 7438-7448, 2010.
- AZADEH, A. et al. Design of integrated information system and supply chain for selection of new facility and suppliers by a unique hybrid meta-heuristic computer simulation algorithm, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 71, n. 5-8, p. 775-793, 2014.
- BALCI, O. A life cycle for modeling and simulation, **Simulation**, vol. 88, n. 7, pp. 870–883, 2012.
- BALLOU, R. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BANDALY, D.; SATIR, A.; SHANKER, L. Impact of lead time variability in supply chain risk management, **International Journal of Production Economics**, 180 (2016), P. 88-100, 2016.
- BANERJEE, S., et al. Controlled partial shipments in two-echelon supply chain networks: a simulation study, **International Journal of Production Economics**, v. 71, n. 1-3, p. 91-100, 2001.
- BANKS J, et al. **Discrete-event system simulation**. 4. Ed. Upper Saddle: Prentice Hall, 2004.
- BEAMON, B. M. Measuring supply chain performance. **The International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 3, p. 275-292, 1999.
- BELEGUNDUN, A. D.; CHANDRUPATLA, T. R. **Optimization concepts and applications in Engineering**, 2 Ed. New York: Prentice Hall, 2011.
- BEN-TAL, A. et al. Robust optimization for emergency logistics planning: risk mitigation in humanitarian relief supply chains, **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 8, p. 1177-1189, 2011.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling, **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.
- BICHOU, K.; BELL, M. G. H; EVANS, A. **Risk management in Port operations, logistics and supply-chain security**. 1 Ed. New York: Informa Law; 2007.
- BISWAS, S.; NARAHARI, Y. Object oriented modeling and decision support for supply chains, **European Journal of Operational Research**, v. 153 (2004), p. 704 – 726, 2004.
- BLACKHURST, J. et al. Supply chain vulnerability assessment: A network based visualization and clustering analysis approach. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 24, n. 1, p. 21 – 30, 2018.
- BLANCHARD, D. **Supply chain management: Best practices**. 2 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2010.
- BLANCO, E. E. et al. Using discrete-event simulation for evaluating non-linear supply chain phenomena. In: Anais do **Winter Simulation Conference (2011)**, Phoenix, Arizona (USA).
- BLOME, C.; SCHOENHERR, T. Supply chain risk management in financial crises: A multiple case-study approach, **International Journal of Production Economics**, v.134, n. 1, p. 43-57, 2011.
- BLOS, M. F.; WEE, H.; YANG, J. Analysing the external supply chain risk driver competitiveness: A risk mitigation framework and business continuity plan, **Journal of Business Continuity & Emergency Planning**, v. 4, n. 4, p. 368-374, 2010.
- BODON, P. et al. Modeling the mining supply chain from mine to port: A combined optimization and simulation approach, **Journal of Mine Science**, v. 47, n. 2, p. 202 – 211, 2011.

- BÓNA, K. et al. The development of an online supply chain simulation game (SCSG). **Transport Engineering Journal**, v. 39, n. 2, p. 105-110, 2011.
- BOULAKSIL, Y.; FRANSOO, J. C.; HALM, E. N. G. van. Setting safety stocks in multi-stage inventory systems under rolling horizon mathematical programming models, **OR Spectrum**, 2009, 31, p. 121 – 140, 2009.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. **Gestão logística da cadeia de suprimentos**. São Paulo: Atlas, 2012.
- BOWERSOX, D. J.; STANK, T. P.; DAUGHERTY, P. Lean launch: Managing product introduction risk through response-based logistics, **Journal of Product Innovation Management**, v. 16, p. 557-568, 1999.
- BOWLING, I. M.; PONCE-ORTEGA, J. M.; EL-HALWAGI, M. M. Facility location and supply chain optimization for a biorefinery. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 10, 6276-6286, 2011.
- BREUER, C. et al. Collaborative risk management in sensitive logistics nodes, **Team Performance Management: An International Journal**, v. 19, n. 7/8, p. 331-351, 2013.
- BRUN, A. et al. Value and risk assessment of supply chain management improvement projects, **International Journal of Production Economics**, vol. 99, p. 186–201, 2006.
- CAMPUZANO, F.; MULA, J. **Supply chain simulation: A system dynamics approach for improving performance**. 1 Ed. New York: Springer, 2011.
- CANCAN, Z.; JUNJIANG, Q.; XIAODONG, Z. Agent behavior based modeling and simulation for pricing coordination in supply chain, **Journal of Convergence Information Technology**, v. 7, n. 23, p. 484 – 493, 2012.
- CARNEIRO, M. C.; RIBAS, G. P.; HAMACHER, S. Risk management in the oil supply chain: a CVaR approach, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, p. 3286–3294, 2010.
- CAROTENUTO, P.; GIORDANI, S.; ZACCARO, A. A simulation based approach for evaluating the impact of maritime transport on the inventory levels of an oil supply chain, **Transportation Research Procedia**, v. 3, p. 710-719, 2014.
- CARVALHO, H. et al. Supply chain redesign for resilience using simulation, **Computers & Industrial Engineering**, v. 62, n. 1, p. 329-341, 2012.
- CAUCHICK MIGUEL, P. et al. (org). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- CAVALLI, R.; GRIGOLATO, S.; PELLEGRINI, M. Determination of the forest road network influence on the supply chain for firewood production by discrete event simulation. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 608, n. 4, p. 41-48, 2011.
- CAVINATO, J. L. Supply chain logistics risks: From the back room to the board room. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 34, n. 5, p. 383–387, 2004.
- CHAN, F. T. S, CHAN, H. K. A simulation study with quantity flexibility in a supply chain subjected to uncertainties. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 19. N. 2, p. 148-160, 2006.
- CHANG, C.; XU, J.; SONG, D. Risk analysis for container shipping: from a logistics perspective, **The International Journal of Logistics Management**, v. 26, n. 1, p. 147-171, 2015.
- CHAN, F.T.S.; ZHANG T. The impact of collaborative transportation management on supply chain performance: A simulation approach, **Expert Systems with Applications**, v. 38, 2011, p. 2319–2329, 2011.
- CHATFIELD, D. C. et al. SISCO: An object-oriented supply chain simulation System, **Decision Support Systems**, v. 42, n. 1, p. 422–434, 2006.
- CHÁVEZ, H. et al. Robotics and computer-integrated manufacturing simulation-based multi-objective model for supply chains with disruptions in transportation, **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 43, n. 2017, p. 39 –49, 2017.
- CHAVEZ, H.; CASTILLO-VILLAR, K. K., WEBB, E. Development of the IBSAL-SimMOpt Method for the Optimization of Quality in a Corn Stover Supply Chain, **Energies**, v. 10, n. 1137, p. 1 – 29, 2017.
- CHEN, K., XIAO, T. Outsourcing strategy and production disruption of supply chain with demand and capacity allocation uncertainties, **International Journal of Production Economics**, v. 170, p. 243-257, 2015.

- CHEN, Y., YUAN, P. Research on supply chain and logistics risk management model. In: *Anais de evento do 1st International Conference on Information Science and Engineering*, 2009. Nanjing, China, 2009.
- CHEN, S. et al. Mean-risk analysis of radio frequency identification technology in supply chain with inventory misplacement: Risk-sharing and coordination, *Omega*, v. 46, p. 86–103, 2014.
- CHEN, J., SOHAL, A. S.; PRAJOGO, D. I. Supply chain operational risk mitigation: a collaborative approach, *International Journal of Production Research*, vol. 51, n° 7, p. 2186-2199, 2013.
- CHEN, Y. et al. Simulation-optimization approach to clinical trial supply chain management with demand scenario forecast, *Computers and Chemical Engineering*, 40 (2012), p. 82–96, 2012.
- CHEN, G.; ZHANG, G.; PANG, J. Study on modeling and simulation of reliability diagnosis of supply chain based on common cause failure, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, v. 5, n. 3, 922-928, 2013.
- CHENG, B.; WANG, S. Supply chain risk evaluation of hotel and catering industry and model construction of informatization management system, *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, v. 7, n. 3, p. 16–23, 2015.
- CHENG, F. et al. Designing flexible supply chain contracts with options. In: Kempf, K. G.; Keskinocak, P.; Uzsoy R. (ed). *Planning production and inventories in the extended enterprise*, 1 Ed, New York: Springer Science + Business Media, 2011.
- CHING, H. Y. *Gestão de estoques na cadeia logística integrada*. São Paulo: Atlas, 2001.
- CHIU, T.; CHOI, C. Supply chain risk analysis with mean-variance models: a technical review. *Annals of Operations research*, vol. 135, p. 1-19, 2013.
- CHIU, M. LIN, Y. Simulation based method considering design for additive manufacturing and supply chain: An empirical study of lamp industry, *Industrial Management & Data Systems*, vol. 116, n. 2, p.322-348, 2016.
- CHOI, T. *Fashion retail supply chain management: A systems optimization approach*. 1 Ed. London: CRC Press, 2014.
- CHOI, T.; CHENG, T. C. *Supply chain coordination under uncertainty*. 1 Ed. Berlin: Springer, 2011.
- CHOI, B. K.; KANG, D. *Modeling and simulation of discrete-event systems*. 1 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- CHOI, K.; NARASIMHAN, R.; KIM, S. W. Postponement strategy for international transfer of products in a global supply chain: A system dynamics examination, *Journal of Operations Management*, vol. 30, p. 167-179, 2012.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. *Supply chain management: Strategy, planning, and operation*. 3 Ed. Upper Saddle River: Prentice Hall; 2007.
- CHOPRA, S.; SODHI, M. S. Managing risk to avoid supply-chain breakdown. *MIT Sloan Management Review*, v. 46, n. 1, p. 53-61, 2004.
- CHRISTOPHER, M. LEE, H. Mitigating supply chain risk through improved confidence, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 34, n. 5, p. 388 – 396, 2004.
- CHRISTOPHER, M.; PECK, H. Building the resilient supply chain. *The International Journal of Logistics Management*, v. 15, n. 2, p. 1-14, 2004.
- CHRISTOPHER M., TOWILL DR. Supply chain migration from lean and functional to agile and customised. *Supply Chain Management, An International Journal*, v. 5, n. 4, p. 206-213, 2000.
- CHU, Y. et al. Simulation-based optimization framework for multi-echelon inventory systems under uncertainty, *Computers and Chemical Engineering*, v. 73 (2015) 1–16, 2015.
- CHUNG, S. H.; TSE, Y. K.; CHOI, T. M. Managing disruption risk in express logistics via proactive planning, *Industrial Management & Data Systems*, v. 115, n. 8, p. 1481-1509, 2015.
- CLOSS, D. J.; SPEIER, C.; MEACHAM, N. Sustainability to support end-to-end value chains: The role of supply chain management. *Journal of the Academy of Marketing Science*, v. 39, n. 1, p. 101-116, 2011.
- COOK, T. A. *Global sourcing logistics: How to manage risk and gain competitive advantage*. 1 Ed. New York: Amaon; 2007.

- COOPER, M. C.; GARDNER, J. T. Building good business relationships: More than just partnering or strategic alliances, **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 23, n. 6, 1993.
- COOPER, M. C.; LAMBERT, D. M.; PAGH, J. D. Supply chain management: more than a new name for logistics, **The International Journal of Logistics Management**, v. 8, n. 1, p. 1-14, 1997.
- COSO - Committee of Sponsoring Organizations. **Enterprise risk management-integrated framework**. New York, 2004.
- CROSON, R. et al. Order stability in supply chains: coordination risk and the role of coordination stock, **Production and Operations Management**, v. 23, n. 2, p. 176 – 196, 2014.
- CROXTON, K. L. et al. The supply chain processes, **The International Journal of Logistics Management**, v. 12, n. 3, p. 13-36, 2001.
- CRUZ, J. M.; NAGURNEY, A.; WAKOLBINGER, T. Financial engineering of the integration of global supply chain networks and social networks with risk management. **Naval Research Logistics**, v. 53, n. 7, p. 674-696, 2006.
- CSCMP - **Council of Supply Chain Management Professionals**. Glossary of Terms. 2013. Disponível em: <http://www.cscmp.org/Website/Resources/Terms.asp>. Acesso em: março de 2017.
- CUCCHIELLA, F., GASTALDI, M. Risk management in supply chain: a real option approach. **Journal of Manufacturing and Technology Management**, v. 17, n. 6, p. 700-720, 2006.
- CUI, Q. et al. Store brand introduction in a two-echelon logistics system with a risk-averse retailer. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 90, p. 69-89, 2016.
- CURKOVIC, S., SCANNEL, T., WAGNER B. **Managing supply chain risk: integrating with risk management**. 1 Ed. Boca Raton: CRC Press; 2016.
- DAUGHERTY, P. J. Review of logistics and supply chain relationship literature and suggested research agenda. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 41, n. 1, p. 16-31, 2011.
- DAVIS, R. A. **Demand-driven inventory optimization and replenishment: Creating a more efficient supply chain**. 2 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- DENOLF, J. M. et al. Towards a framework of critical success factors for implementing supply chain information systems. **Computers in Industry**, v. 68, p. 16-26, 2015.
- DENYER, D., TRANFIELD, D. **Producing a systematic review**. In Buchanan, D.; Bryman, A. (Coord). *The Sage Handbook of organizational research methods*. Thousand Oaks: Sage Publications, p. 671-689, 2008.
- DEV, N. K.; SHANKAR, R.; DEBNATH, R. M. Supply chain efficiency: a simulation cum DEA approach, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 2014, n. 72, p. 1537 – 1549, 2014.
- DÍAZ-DELGADO, C.; INIESTRA, J. G. Flood risk assessment in humanitarian logistics process design. **Journal of Applied Research and Technology**, v. 12, n. 5, p. 976-984, 2014.
- DING, H.; BENYOUCEF, L.; XIE, X. A simulation-based multi-objective genetic algorithm approach for networked enterprises optimization, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 19 (2006), p. 609 – 623, 2006.
- DOMINGUEZ, R.; CANNELLA, S.; FRAMINAN, J. M. On returns and network configuration in supply chain dynamics. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 73, p. 152-167, 2015.
- DONG, A. H.; LEUNG, S.Y.S. A Simulation-based replenishment model for the textile industry, **Textile Research Journal**, v. 79, n. 13, p. 1188 – 1201, 2009.
- DUAN, Q.; LIAO, T. W. Optimization of replenishment policies for decentralized and centralized capacitated supply chains under various demands, **International Journal of Production Economics**, 142 (2013), p. 194 – 204, 2013.
- EHM, H. et al. Towards a supply chain simulation reference model for the semiconductor industry. In. *Anais de eventos do Winter Simulation Conference 2011*, Phoenix, Arizona (USA), p. 2124-2135, 2011.
- EKSIOGLU, B. et al. A simulation model to analyze the impact of outsourcing on furniture supply chain performance. **Forest Products Journal**, v. 60, n. 3, p. 258-265, 2010.

- ELLEUCH, H.; HACHICHA, W.; CHABCHOUD, H. A combined approach for supply chain risk management: description and application to a real hospital pharmaceutical case study. **Journal of Risk Research**, v. 17, n. 5, p. 641-663, 2013.
- ESKANDARPOUR, M. et al. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. **Omega**, v. 54, p. 11-32, 2015.
- ESPER, T. L.; FUGATE, B. S.; SRAMEK, B. D. Logistics Learning Capability: sustaining the competitive advantage gained through logistics leverage. **Journal of Business Logistics**, v. 28, n. 2, 2007.
- FAISAL, M. N.; BANWET, D. K.; SHANKAR, R. Management of risk in supply chains: SCOR approach and analytic network process. **Supply Chain Forum: an International Journal**, v. 8, n. 2, p. 66–79, 2007.
- FARAHANI, R. Z. et al. Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications. **Omega**, v. 45, p. 92-118, 2014.
- FARREL, D. Smarter offshoring. **Harvard Business Review**, v. 84, n. 6, p. 84-92, 2006.
- FAZLI, S.; KIANI MAVI, R.; VOSOOGHIDIZAJI, M. Crude oil supply chain risk management with DEMATEL–ANP. **Operational Research**, v. 15, n. 3, p. 453–480, 2015.
- FETTER, G.; SHOCKLEY, J. Developing students’ understanding of cooperation and multilevel inventory management strategies in supply chains : an in-class spreadsheet simulation exercise. **Decision Sciences Journal of Innovative Education**, v. 12, n. 2, p. 79-89, 2014.
- FILGUEIRA, G.; ALMADA-LOBO, B. Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion, **Simulation Modelling Practice and Theory**, 46 (2014), P. 118–134, 2014.
- FILLA, P.; KLINGEBIEL, K. Risk profiles for the pre-series logistics in automotive ramp-up processes. **Procedia CIRP**. V. 20, p. 44-49, 2014.
- FINCH, P. Supply chain risk management. **Supply Chain Management. An International Journal**, v. 9 (2), p. 183–196, 2004.
- FINK, A. **Conducting research literature review: from internet to paper**. Los Angeles: SAGE Publications, 2014.
- FINK, G. R.; SCHMITT, A.; SINGH, M. Modeling and simulating supply chain schedule risk. In: Anais de evento do **Winter Simulation Conference**, 2010. Baltimore, USA. Maryland: Wintersim (WSC), p. 3472-3481, 2010.
- FISHER, C.H. What is the right supply chain for product? **Harvard Business Review**, v.2, n.75, p.105-116, 1997.
- FLEURY, P. F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K. F. (org.). **Logística empresarial: a perspectiva brasileira**. São Paulo: Atlas, 2000.
- FORRESTER, J. W. **Industrial dynamics**. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology (MIT) Press; 1961.
- FRANSSON, K.; MOLANDER, S. Handling chemical risk information in international textile supply chains. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 568, n. 10, p. 1–17, 2013.
- FRAZZON, E. M. et al. Spare parts supply chains’ operational planning using technical condition information from intelligent maintenance systems, **Annual Reviews in Control**, 38 (2014), p. 147–154, 2014.
- FRAZZON, E. M. et al. Hybrid approach for the integrated scheduling of production and transport processes along supply chains, **International Journal of Production Research**, 19 July 2017, p. 1 – 17, 2017.
- FRIEDMAN, L. W. **The simulation metamodel**. 1 Ed. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- GAN, X.; SETHI, S. P.; YAN, H. Coordination of supply chains with risk-averse agents. **Production and Operations Management**, v. 13, n. 2, p. 135-149, 2004.
- GAONKAR, R. S.; VISWANADHAM, N. Analytical framework for the management of risk in supply chains. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 4, n. 2, p. 265-273, 2007.
- GAUDENZINI, B.; BORGHESI, A. Managing risks in the supply chain using the AHP method. **The International Journal of Logistics Management**, v. 17, n. 1, p. 114–136, 2006.

- GE, H. et al. Supply chain complexity and risk mitigation – A hybrid optimization – simulation model. **International Journal of Production Economics**, v. 179, p. 228–238, 2016.
- GEORGIADIS, P.; ATHANASIOU, E. Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing. **European Journal of Operational Research**, 225 (2013), P. 44–58, 2013.
- GHADERI, H.; PISHVAEE, M. S.; MOINI, A. Biomass supply chain network design: An optimization-oriented review and analysis. **Industrial Crops and Products**, v. 94, p. 972-1000, 2016.
- GHADGE, A.; DANI, S.; KALAWSKY, R. Supply chain risk management: present and future scope. **The International Journal of Logistics Management**, v. 23, n.3, p. 313-339, 2012.
- GHADGE A. et al. A systems approach for modelling supply chain risks. **Supply Chain Management. An International Journal**, v. 18, n. 5, p.523-538, 2013.
- GHIANI, G.; LAPORTE, G.; MUSMANNO, R. **Introduction to logistics systems planning and control**. 1 Ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- GIAROLA, S.; BEZZO, F., SHAH, N. A risk management approach to the economic and environmental strategic design of ethanol supply chains. **Biomass and Bioenergy**, v. 58, p. 31-51, 2013.
- GIL, A. C.. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2006.
- GLIGOR, D. M.; HOLCOMB, M. C.; STANK, T. P. A multidisciplinary approach to supply chain agility: conceptualization and scale development. **Journal of Business Logistics**, v. 34, n. 2, p. 94-108, 2013.
- GOVINDAN, K.; CHAUDHURI, A. Interrelationships of risks faced by third party logistics service providers: A DEMATEL based approach. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 90, p. 177-195, 2016.
- GOVINDAN, K.; FATTAHI, M. Investigating risk and robustness measures for supply chain network design under demand uncertainty: A case study of glass supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 183, p. 680–699, 2017.
- GÜLLER, M. et al. A simulation-based decision support framework for real-time supply chain risk management. **International Journal of Advanced Logistics**, v. 4, n. 1, p. 17–26, 2016.
- GUNASEKARAN, A.; PATEL, C. TIRTIROGLU, E. Performance measures and metrics in a supply chain environment. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 21 n. 1/2, p. 71-87, 2001.
- HABIB, M. (Org.). **Supply Chain Management - Applications and simulations**. Rijeka: Intech, 2011.
- HACHINCHA, W. A simulation metamodelling based neural networks for lot-sizing problem in MTO sector, **International Journal of Modelling and Simulation**, v. 10 (2011), p. 191 – 203, 2011.
- HAFEZALKOTOB, A.; MAKUI, A.; SADJADI, S. J. Strategic and tactical design of competing decentralized supply chain networks with risk-averse participants for markets with uncertain demand. **Mathematical Problems in Engineering**, p. 1-27, 2011.
- HAHN, G. J.; KUHN, H. Value-based performance and risk management in supply chains: A robust optimization approach. **International Journal of Production Economics**, v. 139, n. 1, p. 135–144, 2012.
- HALLIKAS J. et al. Risk management processes in supplier networks. **International Journal of Production Economics**, v. 90, p. 47-58, 2004.
- HAMEDANI, S. G.; JABALAMELI, M. S.; BOZORGI-AMIRI, A. A multi-objective model for locating distribution centers in a supply chain network considering risk and inventory decisions. **Management Science Letters**, v. 3, n. 4, p. 1077–1088, 2013.
- HAN, G.; DONG, M.; SUN, Q. Managing distrust-induced risk with deposit in supply chain contract decisions. **The Scientific World Journal**, p.1-15, 2014.
- HANDFIELD, R. B.; BECHTEL, C. The role of trust and relationship structure in improving supply chain responsiveness. **Industrial Marketing Management**, v. 31, p. 367-382, 2002.
- HANDFIELD, B.; MCCORMACK, K. **Supply chain risk management: minimizing disruptions in global sourcing**. 1 Ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2008.
- HARLAND, C.; BRENCHLEY, R.; WALKER H. Risk in supply networks. **Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 9, n. 2, p. 51-62, 2003.

- HASSAN, S. A.; ABDELSALAM, H. M. An exploratory simulation model for contraception methods' supply chain in Egypt. **Procedia Technology**, v. 16, p. 1403–1410, 2014.
- HAVENGA, J.; SIMPSON, Z. Reducing national freight logistics costs risk in a high-oil-price environment: A South African case study. **The International Journal of Logistics Management**, v. 25, n. 1, p. 35-53, 2014.
- HE, J.; HUANG, Y.; CHANG, D. Simulation-based heuristic method for container supply chain network optimization, **Advanced Engineering Informatics**, v. 29 (2015), p. 339–354, 2015.
- HECKMANN, I.; COMES, T.; NICKEL, S. A critical review on supply chain risk - Definition, measure and modeling, **Omega**, 52, p. 119–132, 2015.
- HENNIES, T. et al. Mesoscopic supply chain simulation, **Journal of Computational Science**, 5 (2014), p. 463–470, 2014.
- HIGUCHI, T.; TROUTT, M. D. Dynamic simulation of the supply chain for a short life cycle product: lessons from the Tamagotchi case. **Computers & Operations Research**, v. 31, n. 7, p. 1097–1114, 2004.
- HLIOUI, R.; GHARBI, A.; HAJJI, A. Integrated quality strategy in production and raw material replenishment in a manufacturing-oriented supply chain, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 81 (2015), p. 335 – 348, 2015.
- HO, W. et al. Supply chain risk management: a literature review. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 16, p. 5031-5069, 2016.
- HOLWEG, M.; BICHENO, J. Supply chain simulation: a tool for education, enhancement and endeavor. **International Journal of Productions Economics**, v. 78, n. 2, p. 163–175, 2002.
- HOLWEG, M. et al. Towards responsive vehicle supply: a simulation-based investigation into automotive scheduling systems. **Journal of Operations Management**, v. 23, n. 5, p. 507-530, 2005.
- HOSIE, P. et al. Determinants of Fifth Party Logistics (5PL): service providers for Supply Chain Management, **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 13, n. 3, p. 287 – 316, 2012
- HOULIHAN, J. B. International Supply Chain Management. **International Journal of Physical Distribution and Materials Management**, v. 15, n. 1, p. 22-38, 1985.
- HOUSHYAR, A. N. et al. Simulating effects of transportation disruption on supply chain based on Vendor Managed Inventory approach. **International Journal of Modeling and Optimization**, v. 3, n. 2, p. 116-119, 2013.
- HRONEC, James. **Sinais Vitais**. São Paulo: Makron Books, 1997.
- HSIEH, C. C.; LU, Y. T. Manufacturer's return policy in a two-stage supply chain with two risk-averse retailers and random demand. **European Journal of Operational Research**, v. 207, n. 1, p. 514–523, 2010.
- HUANG, J.; LI, A. Empirical analysis on perceived risk of enterprise's logistics supervisor for outsourcing logistic business. **International Business Research**, v. 2, n. 2, 175-181, 2009.
- HUANG, M. et al. A coordination of risk management for supply chains organized as virtual enterprises. **Mathematical Problems in Engineering**, p. 1-11, 2013.
- HUDNURKAR, M.; RATHOD, U. Collaborative supply chain: insights from simulation. **International Journal of Systems Assurance Engineering**, v. 3, n. 2, p. 122-144, 2012.
- HUIZHE, Y.; LIHUA, M. Study on effective index of retailing reverse logistics risk factors evaluation and application. In: Anais de eventos do 2nd **International Conference on Computer Science and Information Technology**, 2009; Maastricht, Netherlands, p. 325-327, 2009.
- HUNG, K.; RYU, S. Changing risk preferences in supply chain inventory decisions. **Production Planning & Control**, v. 19, n. 8, p. 770-780, 2008.
- HUSBY, P. C.; SWARTWOOD, D. **Fix your supply chain: How to create a sustainable lean improvement roadmap**. 1 Ed. New York: CRC Press, 2009.
- IANNONE, R.; MIRANDA, S.; RIEMMA, S. Supply chain distributed simulation: An efficient architecture for multi-model synchronization. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 15, n. 3, p. 221-236, 2007.
- INGALLS, R. G. The value of simulation in modeling supply chains. In: Anais de eventos do **Winter Simulation Conference**, 1998; Washington, USA. New York: Wintersim (WSC); p. 1371–1375, 1998.

- IQBAL, K. *Fundamental Engineering optimization methods*. 1 Ed. London: Bookboon, 2013.
- ISO 31000 – Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR ISO 31000. **Gestão de riscos – princípios e diretrizes**, p. 1-24, 2009.
- JAIN, S. et al. Multi-resolution modeling for supply chain sustainability analysis. In: *Anais de evento do Winter Simulation Conference; 2013; Washington, EUA. D.C: Wintersim (WSC); p. 1996-2007, 2013.*
- JEONG, J. G.; HASTAK, M.; SYAL, M. Supply chain simulation modeling for the manufactured housing industry. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 132, n. 4, p. 217-225, 2006.
- JEONG, K.; HONG, J.; XIE, Y. Design of emergency logistics networks, taking efficiency, risk and robustness into consideration. **International Journal of Logistics: Research and Applications**, v. 17, n. 1, p. 1-22, 2014.
- JEREB, B.; IVANUSA, T.; ROSI, B. Systemic thinking and requisite holism in mastering logistics risks: The model for identifying risks in organisations and supply chain. **Amfiteatru Economic**, v. 5, n. 33, p. 56-73, 2013.
- JIANWEI, Z.; MINJIE, Z.; LIWEI, Z. Risk evaluation of the logistics ecological environment system based on FAHP. **Procedia Engineering**, v. 15, p. 381-385, 2011.
- JONKER, J.; PENNINK, B. W. **The essence of research methodology: A concise guide for Master and PhD students in management science**. 1 Ed. Berlin: Springer, 2010.
- JUNG, J. Y. et al. A simulation based optimization approach to supply chain management under demand uncertainty, **Computers and Chemical Engineering**, 28 (2004), p. 2087–2106, 2004.
- JÜTTNER, U. Supply chain risk management: understanding the business requirements from a practitioner perspective. **The International Journal of Logistics Management**, v. 16, n. 1, p. 120-141, 2005.
- JÜTTNER, U.; PECK, H.; CHRISTOPHER, M. An agenda for future research Supply chain risk management : Outlining an agenda for future research. **International Journal of Logistics Research and Applications: A Leading Journal of Supply Chain Management**, v. 6, n. 4, p. 37–41, 2003.
- KANG, J. H.; KIM, Y. D. Inventory control in a two-level supply chain with risk pooling effect. **International Journal of Production Economics**, v. 135, n. 1, p. 116–124, 2012.
- KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. **Aligment: Using Balanced Scorecard to create corporate synergies**. Boston: Harvard Business School Publishing, 2006.
- KARA, A.; DOGAN, I. Reinforcement learning approaches for specifying ordering policies of perishable inventory systems, **Expert Systems With Applications**, 91 (2018), p. 150–158, 2018.
- KAYE, D. **Managing risk and resilience in supply chain**. 1 Ed. London: British Standards Institution; 2008.
- KHATAIE, A. H.; BULGAK, A. A.; SEGOVIA, J. J. Activity-Based Costing and Management applied in a hybrid Decision Support System for order management, **Decision Support Systems**, 52 (2011), p. 142–156, 2011.
- KELTON, D.; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D.T. **Simulation with ARENA**, New York: McGraw-Hill, 2006.
- KENGPOL, A.; TUAMMEE, S. The development of a decision support framework for a quantitative risk assessment in multimodal green logistics: an empirical study. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 4, p. 1020-1038, 2015.
- KIM, K. et al. I-RM: An intelligent risk management framework for context-aware ubiquitous cold chain logistics. **Expert Systems with Applications**, v. 46, p. 463-473, 2016.
- KIM, S.; KIM, S.; KINIRY, J. R. Two-phase simulation-based location-allocation optimization of biomass storage distribution, **Simulation Modelling Practice and Theory**, 86 (2018), p 155–168, 2018.
- KIM, W.-S. A supply chain contract with flexibility as a risk-sharing mechanism for demand forecasting. **International Journal of Systems Science**, v. 44, n. 6, p. 1134–1149, 2013.
- KIRILMAZ, O.; EROL, S. A proactive approach to supply chain risk management: Shifting orders among suppliers to mitigate the supply side risks. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 23, n. 1, p. 54–65, 2017.
- KIRSCHSTEIN, T. **Integrated Supply chain planning in chemical industry: Potentials of simulation in network planning**. 1 Ed. Halle: Springer, 2015.

- KLEIJNEN, J. P. C. **Design and analysis of simulation experiments**. 2 Ed. New York: Springer, 2015.
- KLEIJNEN, J. P. C. Validation of models: Statistical techniques and data availability. In P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, & G. W. Evans (Eds.), *Anais do Winter Simulation Conference*, 1999. p. 647-654. Washington: Omnipress, 1999.
- KLEINDORFER, P. R.; SAAD, G. H. Managing disruption risks in supply chains. **Production and Operations Management**, v. 14, n. 1, p. 53-68, 2005.
- KLEMMT, A. et al. Simulation-based optimization vs. mathematical programming: A hybrid approach for optimizing scheduling problems, **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 25 (2009) p. 917-925, 2009.
- KOGAN, K.; TAPIERO, C. S. **Supply chain games: operations management and risk valuation**. 1 Ed. New York: Springer Science + Business Media, 2007.
- KONNO, H.; YAMAZAKI, H. Mean-absolute deviation portfolio optimization model its applications to Tokyo stock market. **Management Science**, v. 37, n. 5, p. 519-531, 1991.
- KOMOTO, H. et al. Analyzing supply chain robustness for OEMs from a life cycle perspective using life cycle simulation, **International Journal. Production Economics**, 134 (2011), p. 447-457, 2011.
- KOUVELIS P. et al. (Org.). **Handbook of integrated risk management in global supply chains**. 1 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- KULKARNI, S. S.; MAGAZINE, M. J.; RATURI, A. S. On the trade-offs between risk pooling and logistics costs in a multi-plant network with commonality, **IIE Transactions**, v. 37, n. 3, p. 247-265, 2005.
- KULL, T.; CLOSS, D. The risk of second-tier supplier failures in serial supply chains: Implications for order policies and distributor autonomy. **European Journal of Operational Research**, v. 186, n. 3, p. 1158-1174, 2008.
- KUMAR, R. **Research methodology: A step-by-step guide for beginners**. 3 Ed. London: SAGE, 2011.
- KUMAR, A.; MUKHERJEE, K.; KUMAR, N. Modelling, simulation and analysis of control mechanism of a dynamic supply chain system considering supply-price trade-off, using control theory. **Business Process Management**, v. 19, n. 6, p. 933-946, 2013.
- LA LONDE. B. J.; MASTERS, J. M. Emerging logistics strategies: blueprints for the next century. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 24, n. 7, pp. 35-47, 1994.
- LABARTHE, O. et al. Toward a methodological framework for agent-based modelling and simulation of supply chains in a mass customization context. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 15, p. 113-136, 2007.
- LAI, G.; DEBO, L. G.; SYCARA, K. Sharing inventory risk in supply chain: The implication of financial constraint. **Omega**, v. 37, n. 4, p. 811-825, 2009.
- LAM, H. Y. et al. A knowledge-based logistics operations planning system for mitigating risk in warehouse order fulfillment. **International Journal of Production Economics**, v. 179, p. 763-779, 2015.
- LAMBERT, D. M.; POHLEN, T. L. Supply Chain Metrics. **The International Journal of Logistics Management**, v. 12, n. 1, 2001.
- LAMBERT, D. M.; COOPER, M.C.; PAGH, J.D. Supply chain management: implementation issues and research opportunities. **The international Journal of Logistics Management**, v. 9, n. 2, p. 1-19, 1998.
- LAMBERT, D. M.; STOCK, J. R. ; ELLRAM, L.M. **Fundamentals of logistics management**, 1 Ed. Boston, McGraw-Hill, 1998.
- LAVASTRE, O.; GUNASEKARAN, A.; SPALANZANI, A. Supply chain risk management in French companies. **Decision Support Systems**, v. 52, n. 4, 828-838, 2012.
- LE, H. Q. et al. Association rule hiding in risk management for retail supply chain collaboration. **Computers in Industry**, v. 64, n. 7, p. 776-784, 2013.
- LEE, B. K. et al. Data-driven risk measurement of firm-to-firm relationships in a supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 180, p. 148-157, 2016.
- LEE, Y. H.; CHO, M. K.; KIM, Y. B. A discrete-continuous combined modeling approach for supply chain simulation. **Simulation**, v. 78, n. 5, p. 321-329, 2002.

- LEENDERS, M.; JOHNSON, P. F. **Major structural changes in supply organizations**. 1 Ed. Tempe: Center for Advanced Purchasing Studies – CAPS Research; 2000.
- LEMMENS, S. et al. A review of integrated supply chain network design models: Key issues for vaccine supply chains. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 109, p. 366-384, 2016.
- LENTH, R. V. Quick and easy analysis of unreplicated factorials. **Technometrics**, 31(4):469-473, 1989.
- LI, G. et al. Information transformation in a supply chain: a simulation study. **Computers & Operations Research**, v. 32, p. 707-725, 2005.
- LI, L. Effects of enterprise technology on supply chain collaboration: analysis of China-linked supply chain, **Enterprise Information Systems**, v. 6, n. 1, p. 55-77, 2012.
- LI, J.; CHEN, J.; WANG, S. **Risk management of supply chain and cash flows in supply chains**. 1 Ed. New York: Springer Science+Business Media, 2011.
- LI, C.; REN, J.; WANG, H. A system dynamics simulation model of chemical supply chain transportation risk management systems. **Computers and Chemical Engineering**, v. 89, p. 71–83, 2016.
- LIAO, H.; CHANG, H. The optimal approach for parameter settings based on adjustable contracting capacity for the hospital supply chain logistics system. **Expert Systems with Applications**, 38 (2011) 4790–4797, 2011.
- LIEW, K. C.; LEE, C. K. M. Modelling and risk management in the offshore and marine industry supply chain. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 4, n. 1, p. 1–7, 2012.
- LI-JUN, Z. Research on Analysis and Control of Enterprise Logistics Outsourcing Risks. **Energy Procedia**, v. 17, p. 1268-1273, 2012.
- LIU, J.; HE, Y. Coordinating a supply chain with risk-averse agents under demand and consumer returns uncertainty. **Mathematical Problems in Engineering**, p. 1-10, 2013.
- LIU, Z.; NAGURNEY, A. Supply chain outsourcing under exchange rate risk and competition. **Omega**, v. 39, n. 5, p. 539–549, 2011.
- LIU, W.; WANG, Y. Quality control game model in logistics service supply chain based on different combinations of risk attitude. **International Journal of Production Economics**, v. 161, p. 181-191, 2015.
- LIU, Z. et al. Using system dynamics to study the logistics outsourcing cost of risk. **Kybernetes**, v. 41, n. 9, p. 1200-1208, 2012.
- LIU, Y. Optimal decisions of a supply chain with two risk-averse and competing retailers under random demand. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, p. 1-10, 2013.
- LOCKAMY III, A.; MCCORMACK, K. Analysing risks in supply networks to facilitate outsourcing decisions. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 2, p. 593–611, 2010.
- LODREE Jr, E. J.; TASKIN, S. An insurance risk management framework for disaster relief and supply chain disruption inventory planning. **Journal of the Operational Research Society**, v. 59, p. 674-684, 2008.
- LONG, Q.; ZHANG, W. An integrated framework for agent based inventory–production–transportation modeling and distributed simulation of supply chains. **Information Sciences**, v. 277, p. 567–581, 2014.
- LONGO, F. Sustainable supply chain design: an application example in local business retail, **Simulation**, v. 88, n. 12, p. 1484 – 1498, 2012.
- LUENBERGER, D. G.; YE, Y. **Linear and nonlinear programming**. 3 Ed. New York: Springer Science + Business Media, 2008.
- LUMMUS, R. R.; VOKURKA, R. J. Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines. **Industrial Management & Data Systems**, v. 99, n. 1, p. 11–17, 1999.
- LYNCH, G. S. **Single point of failure: the ten essential laws of supply chain risk management**. 1 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2009.
- MA, Y.; FENG, F. On the system dynamics of the logistic risk of marketing channels, **Journal of Software**, v. 8, n. 5, p. 1194 – 1200, 2013.
- MACAL, C. M. To agent-based simulation from system dynamics. In: Anais de evento do 2010 **Winter Simulation Conference**, 2010. Baltimore, USA. Maryland: Wintersim (WSC), p. 371-381, 2010.

- MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v. 4, n. 3, p. 151-162, 2010.
- McSHANE, M. Enterprise risk management: history and a design-science proposal, **The Journal of Risk Finance**, 2018.
- MAGEE, John Francis. **Logística industrial: análise e administração dos sistemas de suprimento e distribuição**. São Paulo: Pioneira, 1977.
- MAHATA, G. C.; DE, S. K. Supply chain inventory model for deteriorating items with maximum lifetime and partial trade credit to credit-risk customers. **International Journal of Management Science and Engineering**, v. 2, p.1-12, 2016.
- MANUJ, I. e MENTZER, J. T. Global supply chain risk management. **Journal of Business Logistics**, v. 29, n. 1, p. 133–155, 2008a.
- MANUJ, I. e MENTZER, J. T. Global supply chain risk management strategies. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 38, n. 3, p. 192–223, 2008b.
- MANUJ, I.; ESPER, T. L.; STANK, T. P. Supply chain risk management approaches under different conditions of risk. **Journal of Business Logistics**, v. 35, n. 3, p. 241–258, 2014.
- MANUJ, I.; SAHIN, F. A model of supply chain and supply chain decision-making complexity. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 41, 5, 511-549, 2011.
- MANUJ, I.; MENTZER, J. T.; BOWERS, M. R. Improving the rigor of discrete-event simulation in logistics and supply chain research. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 39, n. 3, p. 172–201, 2009.
- MARKOWITZ, H. Portfolio Selection. **The Journal of Finance**, v. 7, n. 1, p. 77-91, 1952.
- MARTINS, R. A. **Abordagens quantitativa e qualitativa**. In: CAUCHICK MIGUEL, P. et al. (org). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- MARTINS, R.A., MELLO, C. H. P; TURRIONI, J.B. **Guia para elaboração de monografia e TCC em Engenharia de Produção**. São Paulo: Atlas, 2014.
- MARUFUZZAMAN, M. et al. Analyzing the impact of intermodal-related risk to the design and management of biofuel supply chain. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 69, p. 122-145, 2014.
- MASON-JONES, R.; NAYLOR, B.; TOWILL, D. R. Engineering the leagile supply chain. **International Journal of Agile Management Systems**, v. 2, n. 1, p. 54-61, 2000.
- MASON-JONES, R; TOWILL, D. R. Shrinking the Supply Chain Uncertainty Circle. **IOM Control**, v. 24, n. 7 p. 17-22, 1998.
- MEEPETCHDEE, Y.; SHAH, N. Logistical network design with robustness and complexity considerations. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 37, n. 3, p. 201-222, 2007.
- MELE, F. D. et al. A simulation-based optimization framework for parameter optimization of supply-chain networks. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 45, n. 9, p. 3133 – 3148, 2006.
- MENTZER, J.T. et al. Defining supply chain management. **Journal of Business logistics**, v. 22, n. 2, 2001.
- MERKURYEV, Y. et al. **Simulation-based case studies in logistics**. 1 Ed. London: Springer, 2009.
- MERKURYEVA, G.; MERKURYEV, Y. VANMAELE, H. Simulation-based planning and optimization in multi-echelon supply chains. **Simulation**, v. 88, n. 8, p. 680 – 695, 2011.
- MERKURYEVA, G.; NAPALKOVA, L.; VECHERINSKA, O. **Simulation-based analysis and optimisation of planning policies over the product life cycle within the entire supply chain**. v. 42, 2009.
- MINEGISHI, S.; THIEL, D. System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain, **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 8, n. 5, p. 321-339, 2000.
- MITCHELL, J.C. **Case and situation analysis**, *The Sociological Review*, v. 31, 1995. In: in Smith and Dainty eds., *The Management Research Handbook*, Routledge, v. 31: London, 1991.
- MITROFF, I. I. et al. On managing science in systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon. **Interfaces**, v. 4, n. 3, p. 46-58, 1974.

- MONTEVECHI, J. A. B. et al. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: An application in a Brazilian tech company. In: Anais de evento do **Winter Simulation Conference**, 2010, Baltimore, MD, USA, p. 1624-1634, 2010.
- MONTEVECHI, J. A. B. et al. Economic Evaluation of Scenarios for Manufacturing Systems Using Discrete Event Simulation Based Experiments. **Brazilian Journal of Operations and Production Management**, v. 7, p. 77-103, 2010.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 6 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- MORGAN, C. Structure, speed and salience: performance measurement in the supply chain. **Business Process Management Journal**, v. 10, n. 5, 2004.
- MORTAZAVI, A.; KHAMSEH, A. A.; AZIMI, P. Designing of an intelligent self-adaptive model for supply chain ordering management system. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 37 (2015), p. 207–220, 2015.
- MOTA, M. M.; DE LA MOTA, I. F.; SERRANO, D. G. **Applied simulation and optimization in Logistics, Industrial and Aeronautical Practice**. 1 Ed. New York: Springer Science+Business Media, 2015.
- MULLAI, A. **Risk management system: a conceptual model**. In Zsidisin GA., Ritchie B. Supply chain risk: a handbook of assessment, management, and performance. New York: Springer, 2008.
- MUNHOZ-ROJAS, P. A. **Computational modeling, Optimization and manufacturing simulation of advanced engineering materials**. 1 Ed. Springer, 2016.
- MURAYAMA, T. et al. Production planning and simulation for reverse supply chain, **JSME International Journal**, v. 49, n. 2, p. 281-286, 2006.
- NAG, B.; HAN, C.; YAO, D. Mapping supply chain strategy : an industry analysis. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 25, n. 3, p. 351-370, 2014.
- NAGURNEY, A.; MASOUMI, A.; YU, M. Supply chain network operations management of a blood banking system with cost and risk minimization. **Computational Management Science**, v. 9, n. 2, p. 1-32, 2012.
- NAGURNEY, A.; NAGURNEY, L. S.; LI, D. Securing the sustainability of global medical nuclear supply chains through economic cost recovery, risk management, and optimization. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 8318, n. 5, p. 37–41, 2015.
- NAGURNEY, A. et al. Supply chain networks, electronic commerce, and supply side and demand side risk. **European Journal of Operational Research**, v. 164, n. 1, p. 120–142, 2005.
- NARASIMHAN, R.; TALLURI, S. Perspectives on risk management in supply chains. **Journal of Operations Management**, v. 27, n. 2, p. 114–118, 2009.
- NASH, J. F. Equilibrium points in n-person games. In: Anais de evento da **National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 36, n. 1, p. 48-49, 1950.
- NEELY, A.; GREGORY M.; PLATTES K. Performance measurement systems design: a literature review and research agenda. **International Journal of Operations & Production Management**, v.15, n.4, p.80-116, 1995.
- NEIGER, D.; ROTARU, K.; CHURILOV, L. Supply chain risk identification with value-focused process engineering. **Journal of Operations Management**, v. 27, 154-168, 2009.
- NIKOLOPOULOU, A.; IERAPETRITOU, M. G. Hybrid simulation based optimization approach for supply chain management. **Computers and Chemical Engineering**, 47 (2012) 183–193, 2012.
- NIRANJAN, S.; CIARALLO, F; W. Supply performance in multi-echelon inventory systems with intermediate product demand: a perspective on allocation. **Decision Sciences**, v. 42, n. 3, p. 575 – 617, 2011.
- NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. **Numerical Optimization**. 2 Ed. New York: Springer Science, 2006.
- NOORAIE, S. V.; PARAST, M. M. A multi-objective approach to supply chain risk management: integrating visibility with supply and demand risk. **International Journal of Production Economics**, v. 161, 192-200, 2015.
- NORRMAN, A.; JANSSON, U. Ericsson’s proactive supply chain risk management approach after a serious sub-supplier accident. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 34, n. 5, 434–456, 2004.

- NORRMAN, A.; LINDROTH, R. Supply chain risk management: purchasers' vs planners' views on sharing capacity investment risks in the telecom industry. In: *Anais de evento do 11th International Annual IPSERA Conference*, 2002, Twente University, 25-27 March, pp. 577-95, 2002.
- NOVAES, A. G. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: estratégia, operação e avaliação**. 2 Ed. Rio de Janeiro: Campus, 2007.
- NURMILAAKSO, J. Supply chain scheduling using distributed parallel simulation. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 15, n. 8, 756-770, 2004.
- OEHMEN, J. et al. System-oriented supply chain risk management. **Production Planning and Control**, v. 20, n. 4, p. 343–361, 2009.
- OLIVEIRA, J. B. Processo de formação de indicadores de desempenho logístico: uma relação necessária entre a abordagem sistêmica e a gestão da cadeia de suprimentos. **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Produção, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), 2008.
- OLIVEIRA, J. B.; LIMA, R. S.; MONTEVECHI, J. A. B. Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 62, p. 166 – 191, 2016.
- OLIVEIRA, J. B. et al. The role of simulation and optimization methods in supply chain risk management: Performance and review standpoints. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 92, p. 17 – 44, 2019.
- OLIVEIRA, U. R. et al. The ISO 31000 standard in supply chain risk management. **Journal of Cleaner Production**, 151 (2017), p. 616 -633, 2017.
- OLIVER, R. K.; WEBBER, M. D. **Supply-Chain Management: Logistics catches up with strategy**. In M. L. Christopher (Ed.), *Logistics: The strategic issues*. London: Chapman & Hall, p. 63–75, 1982.
- OLSON, D. L.; WU, D. Risk management models for supply chain: a scenario analysis of outsourcing to China. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 16, n. 6, p. 401–408, 2011.
- OLSON, D. L. **Supply chain risk management: tools for analysis**. 2 Ed. New York: Business Expert Press; 2014.
- PARK, Y.; KIM, H. Simulation-based evolutionary algorithm approach for deriving the operational planning of global supply chains from the systematic risk management. **Computers in Industry**, 83 (2016), p. 68–77, 2016.
- PAUL, S. K. Supplier selection for managing supply risks in supply chain: a fuzzy approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p 1-8, 2015.
- PECK, H. Drivers of supply chain vulnerability: an integrated framework, **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 35, n. 4, p. 210 – 232, 2005.
- PENG, M.; PENG, Y.; CHEN, H. Post-seismic supply chain risk management: a system dynamics disruption analysis approach for inventory and logistics planning. **Computers & Operations Research**, v. 42, p. 14-24, 2014.
- PERSSON, F.; ARALDI, M. The development of a dynamic supply chain analysis tool: integration of SCOR and discrete event simulation. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 2, p. 574–583, 2009.
- PERSSON, F.; OLHAGER, J. Performance simulation of supply chain designs. **International Journal of Production Economics**, v. 77, n. 3, p. 231–245, 2002.
- PERSSON, F. et al. Supply chain dynamics in the SCOR model – A simulation modeling approach. In: **Anais de evento do Winter Simulation Conference**; 2012; Berlin, Germany: Wintersim (WSC); p. 3821-3832, 2012.
- PETERSEN, H. L.; LEMKE, F. Mitigating reputational risks in supply chains. **Supply Chain Management**, v. 20, n. 5, p. 495–510, 2015.
- PETROVIC, D.; ROY, R.; PETROVIC, R. Modelling and simulation of a supply chain in an uncertain environment. **European Journal of Operational Research**, v. 109, n. 2, 1998, p. 299–309.
- PIDD M. **Systems modelling: theory and practice**. In Pidd, M. 1 Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
- PIDD M. **Tools for thinking: Modelling in management science**. 1 Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.
- PIEWTHONGNGAM, K.; PATHUMNAKUL, S.; SETTHANAN, K. Application of crop growth simulation and mathematical modeling to supply chain management in the Thai sugar industry, **Agricultural Systems**, 102 (2009), p. 58–66, 2009.

- PIRIM, H.; AL-TURKI, U.; YILBAS, B. S. **Supply chain management and optimization in manufacturing**. 1 Ed. New York: Springer Science+Business Media, 2014.
- PISTIKOPOULOS, E. N.; GEORGIADIS, M. C.; DUA, V. **Process systems engineering**. 1 Ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- PITTY, S. S. et al. Decision support for integrated refinery supply chains. **Computers & Chemical Engineering**, v. 32, n. 11, 2767-2786, 2008.
- POLAT, G. et al. Simulation-based decision support system for economical supply chain management of rebar. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 133, n. 1, p. 29-39, 2007.
- PONSIGNON, T.; MONCH, L. Simulation-based performance assessment of master planning approaches in semiconductor manufacturing. **Omega**, 46 (2014), p. 21-35, 2014.
- PORTER, M. E. **Competitive advantage: creating and sustaining superior performance**. 1 Ed. New York: The Free Press, 1985.
- PRADHAN, S. K., ROUTROY, S. Analyzing the supply chain risk issues for an Indian manufacturing company. **Journal of Advances in Management**, v. 11, n. 2, p. 144-162, 2014.
- PRAKASH, S., SONI, G., RATHORE, A. P. S. A grey based approach for assessment of risk associated with facility location in global supply chain. **Grey Systems: Theory and Application**, v. 5, n. 3, p. 419-436, 2015.
- PUJAWAN, I. N.; GERALDIN, L. H. House of risk: a model for proactive supply chain risk management. **Business Process Management Journal**, v. 15, n. 6, p. 953 – 967, 2009.
- QI, L.; SHEN, Z. M.; SNYDER, L. V. The effect of supply disruptions on supply chain design decisions. **Transportation Science**, v. 44, n. 2, p. 274-289, 2010.
- QU, S. J. et al. Proximal point algorithms for convex multi-criteria optimization with applications to supply chain risk management. **Journal of Optimization Theory and Applications**, v. 163, n. 3, p. 949-956, 2014.
- RABELO, L. et al. Value chain analysis using hybrid simulation and AHP. **International Journal of Production Economics**, 105 (2007), p. 536 – 547, 2007.
- RABELO, L.; SARMIENTO, A. T.; JONES, A. Stability of the supply chain using system dynamics simulation and the accumulated deviations from equilibrium. **Modelling and Simulation in Engineering**, 2011, p. 1-10, 2011.
- RAJ, T. S.; LAKSHMINARAYANAN, S. Performance assessment/enhancement methodology for supply chains. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2008 (47), p. 748 – 759, 2008.
- RANGEL, D. A.; DE OLIVEIRA, T. K.; LEITE, M. S. A. Supply chain risk classification: discussion and proposal. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 22, p. 6868-6887, 2014.
- RAO, S. S. **Engineering optimization: Theory and practice**. 4 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc; 2009.
- RAO, S.; GOLDSBY, T. J. Supply chain risks: a review and typology. **The International Journal of Logistics Management**, v. 20, n. 1, p. 97 – 123, 2009.
- REDDY, R. H. et al. A Multi-Agent System based simulation approach for planning procurement operations and scheduling with multiple cross-docks. **Computers & Industrial Engineering**, 107 (2017), p. 289-300, 2017.
- REINER, G.; TRCKA, M. Customized supply chain design: Problems and alternatives for a production company in the food industry. A simulation based analysis. **International Journal of Production Economics**, v. 89, n. 2, 217-229, 2004.
- REINER, G. **Rapid modeling for increasing competitiveness**. 1 Ed. London: Springer Science+Business Media, 2009.
- RIJGERSBERG, H. Modeling logistic performance in quantitative microbial risk assessment. **Risk Analysis**, v. 30, n. 1, p. 20-31, 2010.
- RIOPEL, D.; LANGEVIN, A.; CAMPBELL, J. F. **The network of logistics decisions**. In: Logistics systems: design and optimization. Langevin A., Riopel D. (Ed). New York: Spriger Science + Business Media; 2005.
- RITCHIE, B.; BRINDLEY, C. Supply chain risk management and performance. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 27, n. 3, p. 303-322, 2007.

- ROBINSON, S. **Simulation: the practice of model development and use**. 1 Ed. Chichester: John Wiley & Sons; 2004.
- ROCKAFELLAR, R. T.; URYASEV, S. Optimization of conditional value-at-risk. **Journal of Risk**, v. 2, n. 3, p. 21 – 41, 2001.
- RODGER, J. A. Application of a fuzzy feasibility Bayesian probabilistic estimation of supply chain backorder aging, unfilled backorders, and customer wait time using stochastic simulation with Markov Blankets. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 16, p. 7005–7022, 2014.
- ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. An examination of reverse logistics practices. **Journal of Business Logistics**, v. 22, n. 2, 2001.
- ROSSETTI, M. D. **Simulation modeling and Arena**. 1 Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- ROY, S. N.; SENGUPTA, T. Quintessence of third party (3PL) logistics. **Journal of Global Operations and Strategic Sourcing**, v. 11, n. 2, p.146-173, 2018.
- RUNGTUSANATHAM, M. et al. Supply-chain linkages and operational performance: A resource-based-view perspective. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 23, n. 9, p. 1084-1099, 2003.
- RYTILÄ, J. S.; SPENS, K. M. Using simulation to increase efficiency in blood supply chains. **Management Research News**, v. 29, n. 12, p. 801-819, 2006.
- SAAD, N.; KADIRKAMANATHAN, V. A DES approach for the contextual load modelling of supply chain system for instability analysis. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 4, p. 541-563, 2006.
- SADEGUI, J. et al. Optimizing a multi-vendor multi-retailer vendor managed inventory problem: Two tuned meta-heuristic algorithms. **Knowledge-Based Systems**, v. 50, p. 159-170, 2013.
- SAHAY, N.; IERAPETRITOU, M. Multienterprise Supply Chain : Simulation and optimization, **AICHe Journal**, v. 62, n. 9, 2016.
- SAHAY, N.; IERAPETRITOU, M. Flexibility assessment and risk management in supply chains. **AICHe Journal**, v. 61, n. 12, p. 4166-4178, 2015.
- SAHAY, N.; IERAPETRITOU, M. Hybrid simulation based optimization framework for centralized and decentralized supply chains. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, p. 3996–4007, 2014.
- SAHAY, N.; IERAPETRITOU, M. Supply chain management using an optimization driven simulation approach, **AICHe Journal**, v. 59, n. 12, p. 4612 – 4626, 2013.
- SAHRAEIAN, R.; GERANMAYEH, A. F.; REZAEI, H. R. A reliability approach on redesigning the warehouses in supply chain with uncertain parameters via integrated Monte Carlo simulation and tuned artificial neural network. **International Journal of Applied Operational Research**, v. 3, n. 2, p. 53–65, 2013.
- SAMMONS Jr., N. et al. A flexible framework for optimal biorefinery product allocation. **Environmental Progress**, v. 26, n. 4, p. 349 – 354, 2007.
- SANGARI, M. S.; RAZMI, J. Business intelligence competence, agile capabilities, and agile performance in supply chain", **The International Journal of Logistics Management**, v. 26, n. 2, p. 356 – 380, 2015.
- SANTOSO, T. et al. A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 167, p. 96-115, 2005.
- SARGENT, R. G. A historical view of hybrid simulation/analytic models. In: Anais de evento do **Winter Simulation Conference**, 1994. Orlando, USA. Florida: Wintersim (WSC), p. 383-386, 1994.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **Journal of Simulation**, (2013) 7, p. 12 – 24, 2013.
- SATTAYAPRASERT, W. et al. Creating a risk-based network for hazmat logistics by route prioritization with AHP. **IATSS Research**, v. 32, n. 1, p. 74-87, 2008.
- SAWIK T. On the risk-averse optimization of service level in a supply chain under disruption risks. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 1, p. 98-113, 2016.
- SAWIK T. On the fair optimization of cost and customer service level in a supply chain under disruption risks. **Omega**, v. 53, p. 58–66, 2015.

- SAWIK T. Optimization of cost and service level in the presence of supply chain disruption risks: Single vs. multiple sourcing. **Computers & Operations Research**, v. 51, p. 11-20, 2014.
- SCANNELL, T. V. et al. Supply chain risk management within the context of COSO's enterprise risk management framework. **Journal of Business Administration Research**, v. 2, n. 1, p. 15 – 28, 2013.
- SCHÄTTER, F.; WIENS, M.; SCHULTMANN, F. A new focus on risk reduction: An ad-hoc decision support system for humanitarian relief logistics. **Ecosystem Health and Sustainability**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2015.
- SHELLER-WOLF, A.; TAYUR, S. Risk sharing in supply chains using order bands — Analytical results and managerial insights. **International Journal of Production Economics**, v. 121, p. 715-727, 2009.
- SCHLEGEL, G. L.; TRENT, R. J. **Supply chain risk management: an emerging discipline**. 1 Ed. Boca Raton: CRC Press; 2015.
- SCHMITT, A. J. Strategies for customer service level protection under multi-echelon supply chain disruption risk. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 8, p. 1266–1283, 2011.
- SCHMITT, A. J.; SINGH, M. A quantitative analysis of disruption risk in a multi-echelon supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 139, n. 1, p. 22–32, 2012.
- SCHMITT, A. J.; SNYDER, L. V. Infinite-horizon models for inventory control under yield uncertainty and disruptions. **Computers & Operations Research**, v. 39, p. 850-862, 2012.
- SCHÜLER, F.; HENKE, M. Smart supply chain risk management – a conceptual framework. In Anais de evento do **Hamburg International Conference of Logistics (HICL)**, p. 359 – 358, 2017.
- SECO, A.; VIEIRA, C. A multi-agent supply chain simulation analysis through a statistical mixed model. **Procedia Technology**, v. 16, n. 1, p. 163-171, 2014.
- SELVIARIDIS, K.; SPRING, M. Third party logistics: a literature review and research agenda. **The International Journal of Logistics Management**, v. 18, n. 1, p.125-150, 2007.
- SHAOYUN, R. Assessment on logistics warehouse fire risk based on analytic hierarchy. **Procedia Engineering**, v. 45, p. 59-63, 2012.
- SHARMA, S.; GANDHI, M. S. Exploring correlations in components of green supply chain practices and green supply chain performance. **Competitiveness Review**, v. 26, n. 3, p. 332-368, 2016.
- SHU, T. et al. GBOM-oriented management of production disruption risk and optimization of supply chain construction. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 1, p. 59-68, 2014.
- SHUKLA, S. K. et al. Optimization of the supply chain network: Simulation, Taguchi, and Psychoclonal algorithm embedded approach. **Computers & Industrial Engineering**, v. 58, n. 1, p. 29-39, 2010.
- SIDDIQUI, A.; KHAN, M.; AKHTAR, S. Supply chain simulator: a scenario-based educational tool to enhance student learning. **Computers & Education**, v. 51, n. 1, p. 252-261, 2008.
- SILVA, L. et al. Proposed model for risk assessment. **IJC**, v. 4, p. 1 – 8, 2017.
- SINGH, R. K. Developing the framework for coordination in supply chain of SMEs. **Business Process Management Journal**, v. 17, n. 4, p. 619-638, 2011.
- SINGH, A.; CHU, Y.; YOU, F. Biorefinery supply chain network design under competitive feedstock markets: an agent-based simulation and optimization approach. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2014 (53), p. 15111-15126, 2014.
- SINGH, A. R., MISHRA, P. K. e JAIN, R. Design of global supply chain network with operational risks, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 60, p. 273–290, 2012.
- SINGHAL, P.; AGARWAL, G.; MITTAL, M. L. Supply chain risk management : review , classification and future research directions. **International Journal of Business Science and Applied Management**, v. 6, n. 3, p. 15–42, 2011.
- SKENDER, H. P.; HOST, A.; NUHANOVIC, M. The role of logistics service providers in international trade. In: **Anais do evento do 16<sup>th</sup> International Scientific Conference Business Logistics in Modern Management**, 2016. Osijek, Croácia. P. 21 – 37, 2016.
- SMEW, W.; YOUNG, P.; GERAGHY, J. Supply chain analysis using simulation, Gaussian process modeling and optimization. **International Journal of Simulation and Process Modelling**, v. 3, p. 178-189, 2013.

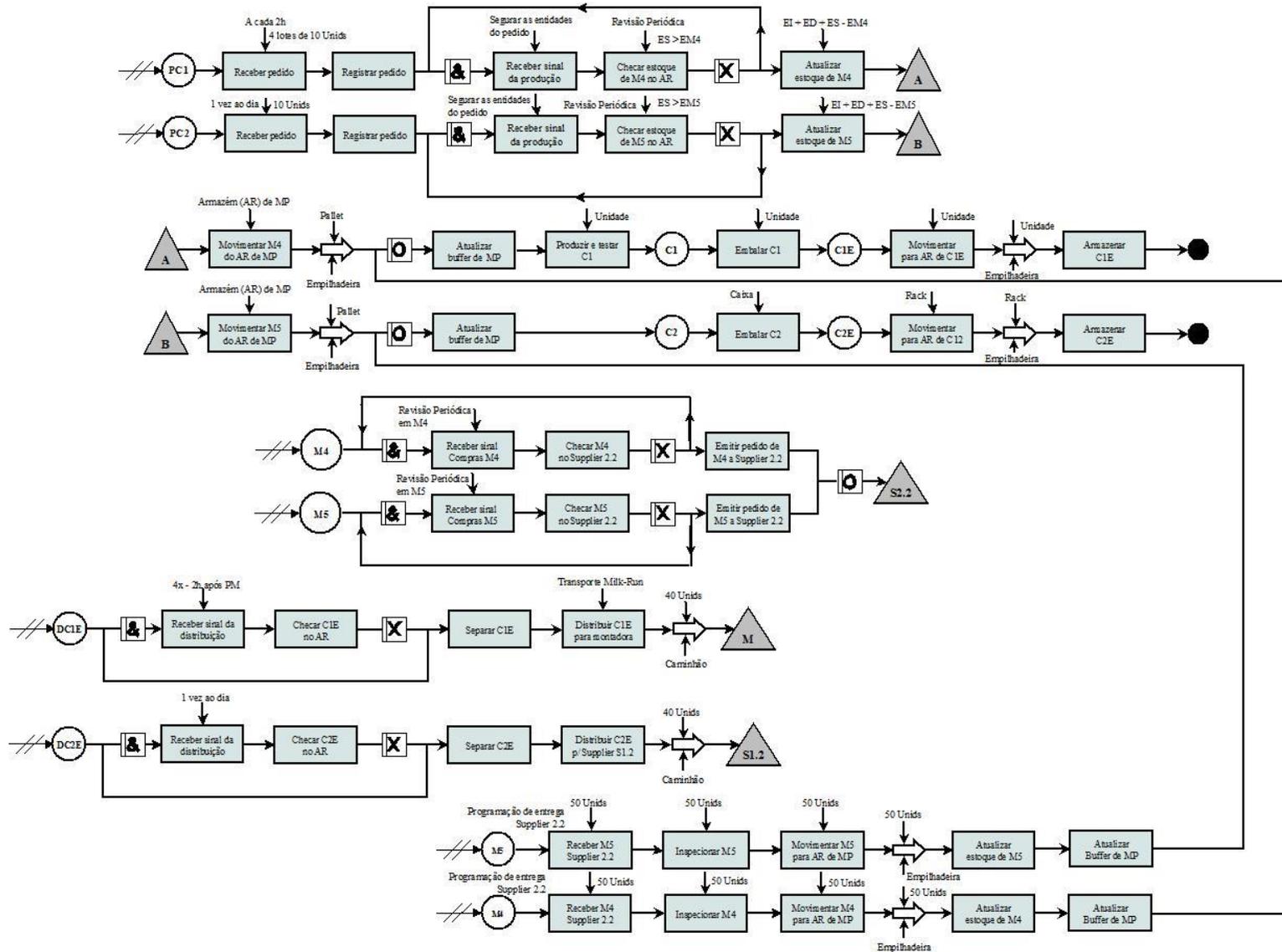
- SODHI, M. S. Managing demand risk in tactical supply chain planning for a global consumer electronics company. **Production and Operations Management**, v. 14, n. 1, p. 69-79, 2005.
- SODHI, M. S.; TANG, C. S. **Managing supply chain risk**. 1 Ed. New York: Springer; 2012.
- SODHI, M. S.; SON, B.; TANG, C. S. Researchers' perspectives on supply chain risk management. **Production and Operations Management**, v. 21, n. 1, p. 1-13, 2012.
- SOKOLOV, V.; AULD, J.; HOPE, M. A flexible framework for developing integrated models of transportation systems using an agent-based approach. **Procedia Computer Science**, v.10, p. 854-859, 2012.
- SOKOLOWSKI, J. A.; BANKS, C. M. **Principles of modeling and simulation**. 1 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2009.
- SOLEIMANI, H.; GOVINDAN, K. Reverse logistics network design and planning utilizing conditional value at risk. **European Journal of Operational Research**, v. 237, n. 2, p. 487-497, 2014.
- SPEKMAN, R. E.; KAMAUFF JR, J. W.; MYHR, N. An empirical investigation into supply chain management. A perspective on partnerships. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 28, n. 8, p. 630-650, 1998.
- SPEKMAN, R. E.; SPEAR, J.; KAMAUFF, J. Supply chain competency: learning as a key component. **Supply chain Management: An International Journal**, v. 7, n. 1, p 41-55, 2002.
- SRAI, J. S.; GREGORY, M. A supply network configuration perspective on international supply chain development. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 28, n. 5, p. 386-311, 2008.
- SVANBERG, M.; HALLDÓRSSON, Á. Supply chain configuration for biomass-to-energy: the case of torrefaction. **International Journal of Energy Sector Management**, v. 7, n. 1, p. 65-83, 2013.
- SVENSSON, G. A typology of vulnerability scenarios towards suppliers and customers in supply chains based upon perceived time and relationship dependencies. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 32, p. 168-187, 2002.
- SVENSSON, G. A conceptual framework for the analysis of vulnerability in supply chains. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 30, n. 9, p. 731 – 750, 2000.
- TABRIZI, B. H.; RAZMI, J. Introducing a mixed-integer non-linear fuzzy model for risk management in designing supply chain networks. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 2, p. 295-307, 2013.
- TAH, J. H. M.; CARR, V. Towards a framework for project risk knowledge management in the construction supply chain. **Advances in Engineering Software**, v. 32, n. 10–11, p. 835–846, 2001.
- TALLURI, S. et al. Assessing the efficiency of risk mitigation strategies in supply chains. **Journal of Business Logistics**, v. 34, n. 4, p. 253-269, 2013.
- TANG, C. S. Perspectives in supply chain risk management. **International Journal of Production Economics**, v. 103, n° 1, p. 451–488, 2006a.
- TANG, C. S. Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. **International Journal of Logistics**, v. 9, n. 1, p. 33–45, 2006b.
- TAYLOR, S. J. E. et al. GRIDS-SCF: an infrastructure for distributed supply chain simulation. **Simulation**, v. 78, n. 5, p. 312–320, 2002.
- TERZI, S.; CAVALIERI, S. Simulation in the supply chain context: a survey. **Computers & Industrial Engineering**, v. 53, n. 1, p. 3–16, 2004.
- THAKKAR, J.; KANDA, A.; DESHMUKH, S. G. Supply chain performance measurement framework for small and medium scale enterprises. **Benchmarking: An International Journal**, v. 16, n. 5, p. 702 – 723, 2009.
- TOMLIN, B. On the Value of Mitigation and Contingency Strategies for Managing Supply Chain Disruption Risks. **Management Science**, v. 52, n. 5, p. 639–657, 2006.
- TOWILL, D. R. The impact of business policy on bullwhip induced risk in supply chain management. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 35, n. 8, p. 555-575, 2005.
- TRANFIELD, D., DENYER, D. e SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 1, p. 207–222, 2003.

- TRENT, R. J.; MONCZKA, R. M. Achieving excellence in global sourcing. **MIT Sloan Management Review**, p. 24-32, 2005.
- TRKMAN, P.; OLIVEIRA, M. P. V.; MCCORMACK, K. Value-oriented Supply chain risk management: you get what you expect. **Industrial Management & Data Systems**, v. 116, n. 5, p. 1061 – 1083, 2016.
- TSAI, M-C.; SU, Y. S. Political risk assessment on air logistics hub developments in Taiwan. **Journal of Air Transport Management**, v. 8, n. 6, p. 373-380, 2002.
- TSAI M-C. et al. The dark side of logistics outsourcing - Unraveling the potential risks leading to failed relationships. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 48, n. 1, 178-189, 2012.
- TSAI, M-C.; LIAO, C-H.; HAN, C. S. Risk perception on logistics outsourcing of retail chains: model development and empirical verification in Taiwan. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 13, n. 6, p. 415-424, 2008.
- TSANG, Y. P. et al. An Internet of Things (IoT)-based risk monitoring system for managing cold supply chain risks. **Industrial Management & Data Systems**, p. 1 – 32, 2018.
- TSAO, Y-C. Replenishment policies considering trade credit and logistics risk. **Scientia Iranica**, v. 18, n. 3, p. 753-758, 2011.
- TSE, Y. K.; TAN, K. H. Managing product quality risk and visibility in multi-layer supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 139, n.1, p. 49-57, 2012.
- TUMMALA, R.; SCHOENHERR, T. Assessing and managing risks using the Supply Chain Risk Management Process (SCRMP). **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 16, n. 6, p. 474–483, 2011.
- TUNCEL, G. e ALPAN, G. Risk assessment and management for supply chain networks: A case study. **Computers in Industry**, vol. 61, p. 250–259, 2010.
- VAN DER ZEE, D. J.; VAN DER VORST, J. G. A. J. A Modeling framework for supply chain simulation: opportunities for improved decision making. **Decision Science**, v. 36, n. 1, p. 65-95, 2005.
- VEEKE, H. P. M. **Simulation integrated design for logistics**. 1 Ed. Delft: DUP Science, 2003.
- VENKATESAN, P. S.; KUMANAN, S. Multi-objective supply chain sourcing strategy design under risk using PSO and simulation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 61, n 1-4, p. 325-337, 2012.
- VIDALAKIS, C.; TOOKEY, J. E.; SOMMERVILLE, J. Logistics simulation modelling across construction supply chains. **Construction Innovation: Information, Process, Management**, v. 11, n. 2, 2011, p. 212–228.
- VOLLMANN, T.; CORDON, C.; RAABE, H. **Supply chain management: making the virtual organization work**. Executive Report, Lausanne: IMD (International Institute for Management Development), n. 19, 1996.
- VON NEUMANN, J.; MORGENSTERN, O. **Theory of games and economic behavior**. 1 Ed. New Jersey: Princeton University Press, 1953.
- WAGNER, S. M.; BODE, C. An empirical examination of supply chain performance along several dimensions of risk. **Journal of Business Logistics**, v. 29, n. 1, p. 307 – 325, 2008.
- WALTERS, C. D. **Supply chain risk management: vulnerability and resilience in logistics**. 1 Ed., London: Kogan Page; 2007.
- WALTERS, D. **Global logistics**. New directions in supply chain risk management. 6 Ed. London: Kogan Page Limited, 2012.
- WAN, X. et al. A simulation based optimization framework to analyze and investigate complex supply chains. **Process Systems Engineering**, p. 630 – 635, 2003.
- WANG, H.; HSU, H. Resolution of an uncertain closed-loop logistics model: An application to fuzzy linear programs with risk analysis. **Journal of Environmental Management**, 91 (2010), p. 2148 – 2162, 2010.
- WAN, X.; PEKNY, J. F.; REKLAITIS, G. V. Simulation-based optimization with surrogate models — Application to supply chain management. **Computers & Chemical Engineering**, v. 29, n. 1, p. 1317-1328, 2005.
- WANG, et al. Hybrid modeling and simulation of automotive supply chain network, **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 6, n. 9, 1598-1605, 2013.

- WANG, Y. Research on risk control of logistics park construction project based on reliability theory. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 96, 2194 – 2200, 2013.
- WANG, H.; JIA, S. Impact of echelon ratio for bullwhip effect in three-echelon supply chain based on multiagent simulation. **Journal of Computers**, v. 8, n. 10, 2013.
- WANG, G. G.; SHAN, S. Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization. **ASME Transactions, Journal of Mechanical design**, 2006.
- WATHNE, K. H.; HEIDE, J. B. Relationship Governance in a Supply Chain Network. **Journal of Marketing**, v. 68, n. 1, p. 73-89, 2004.
- WEBB, G. S.; THOMAS, S. P.; LIAO-TROTH, S. Teaching Supply Chain Management Complexities: A SCOR Model Based Classroom Simulation. **Decision Sciences Journal of Innovative Education**, v. 12, n. 3, p. 181-198, 2014.
- WEI-HUA, L. et al. An emergency order allocation model based on multi-provider in two-echelon logistics service supply chain. **Supply Chain Management**, v. 16, n. 6, p. 391–400, 2011.
- WEN, L.; OUYANG, M. Risk evaluation of cold logistics chain based on cloud model. **Research Journal of Applied Sciences**, v. 5, n. 6, p. 2019-2026, 2013.
- WERY, J. et al. Simulation-optimisation based framework for sales and operations planning taking into account new products opportunities in a co-production context. **Computers in Industry**, 94 (2018), p. 41–51, 2018.
- WHITE, D. Application of systems thinking to risk management: a review of the literature. **Management Decision**, v. 33, n. 10, p. 35-45, 1995.
- WIELAND, A.; WALLENBURG, C. M. Dealing with supply chain risks. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 42, n. 10, p. 887–905, 2012.
- WOERNER, S.; LAUMANN, M.; WAGNER, S. M. Simulation-based optimization of capacitated assembly systems under beta-service level constraints. *Decision Sciences*, v. 49, n. 1, p. 180 – 217, 2018.
- WRIGHT, G. Purchasing, risk and logistics: a neglected combination? **International Journal of Operations & Production Management**, v. 1, n.1, p. 47-58, 1980.
- WU, T.; BLACKHURST, J. (Org.). **Managing supply chain risk and vulnerability**. 1 Ed. New York: Springer; 2009.
- WU, D.; OLSON, D. L. Supply chain risk, simulation, and vendor selection. **International Journal of Production Economics**, v. 114, n. 2, p. 646–655, 2008.
- WU, T. BLACKHURST, J.; CHIDAMBARAM, V. A model for inbound supply risk analysis. **Computers in Industry**, 57 (2006), p. 350–365, 2006.
- WU, T. et al. Supply Chain Risk Management: An Agent-Based Simulation to study the impact of retail stockouts. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 60, n. 4, p. 676-686, 2013.
- XANTHOPOULOS, A.; IAKOVOU, E. On the optimal design of the disassembly and recovery processes. **Waste management**, 29 (2009) p. 1702–1711, 2009.
- XANTHOPOULOS, A.; VLACHOS, D.; IAKOVOU, E. Optimal newsvendor policies for dual-sourcing supply chains: a disruption risk management framework. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 2, p. 350-357, 2012.
- XIA, D.; CHEN, B. A comprehensive decision-making model for risk management of supply chain. **Expert Systems with Applications**, v.38, n. 5, p. 4957-4966, 2011.
- XIA, Y.; RAMACHANDRAN, K.; GURNANI, H. Sharing demand and supply risk in a supply chain. **IIE Transactions**, v. 43, n. 6, 451-469, 2011.
- XIAO, R.; CAI, Z.; ZHANG, X. An optimization approach to to risk decision-making of closed-loop logistics based on SCOR model. **Optimization**, v. 61, n. 10, p. 1221-1251, 2009.
- XIAO, T.; YANG, D. Price and service competition of supply chains with risk-averse retailers under demand uncertainty. **International Journal of Production Economics**, v. 114, n. 1, p. 187–200, 2008.
- XIE, K. F. et al. Early-warning management of inner logistics risk in SMEs based on label-card system. **Production Planning and Control**, v. 20, n. 4, p. 306-319, 2009.

- XU, W. et al. Neural network model for the risk prediction in cold chain logistics. **International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering**, v. 9, n. 8, p. 111-124, 2014.
- XU, X. S.; MENG, Z. Q.; SHEN, R. A tri-level programming model based on Conditional Value-at-Risk for three-stage supply chain management. **Computers & Industrial Engineering**, v. 66, n. 2, p. 470-475, 2013.
- YALAOUI, A. et al. **Optimization of logistics**. 1 Ed. London: ISTE Ltd, 2012.
- YAN, Y.; SUO, B. Risks analysis of logistics financial business based on evidential Bayesian Network. **Mathematical Problems in Engineering**, p. 1-13, 2013.
- YAN, H.; YAN, P.; MA, L. Retailing reverse logistics risk factors assessment based on triangular Fuzzy number. In: Anais de evento do **Second International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling**; 2009. Wuhan, China, 2009.
- YANG, D.; XIAO, T.; SHEN, H. Pricing, service level and lot size decisions of a supply chain with risk-averse retailers: implications to practitioners. **Production Planning & Control**, v. 20, n. 4, p. 320–331, 2009.
- YANIK, S. Reverse logistics network design under the risk of hazardous materials transportation. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 21, n. 5, p. 1277-1298, 2015.
- YE, W.; YOU, F. A computationally efficient simulation-based optimization method with region-wise surrogate modeling for stochastic inventory management of supply chains with general network structures. **Computers & Chemical Engineering**, v. 87, n. 1, p. 164-179, 2016.
- YEH, D.; CHENG, C.; CHI, M. A modified two-tuple FLC model for evaluating the performance of SCM: By the Six Sigma DMAIC process. **Applied Soft Computing**, v. 7, p. 1027–1034, 2007.
- YOU, F.; WASSICK, J. M.; GROSSMANN, I. E. Risk management for a global supply chain planning under uncertainty: models and algorithms. **AIChE Journal**, v. 55, n. 4, p. 931-946, 2009.
- YOO, T.; CHO, H.; YUCESAN, E. Hybrid algorithm for discrete event simulation based supply chain optimization. **Expert Systems with Applications** 37 (2010), p. 2354–2361, 2010.
- YOO, J. S.; HONG, S. R.; KIM, C. O. Service level management of nonstationary supply chain using direct neural network controller. **Expert Systems with Applications**, 36 (2009), p. 3574 – 3586, 2009.
- ZSIDISIN, G. A., ELLRAM, L. M. An agency theory investigation of supply risk management. **Journal of Supply Chain Management**, vol. 39, n° 3, p. 15-27, 2003.

## APÊNDICE A - IDEF-SIM do supplier 1.3



Notações: PC1 (Pedido de componente 1); PC2 (Pedido de componente 2); Unidades (Unidade); ES (Estoque de segurança); EM4 (Estoque Material 4); EM5 (Estoque Material 5); AR (Armazém); EI (Estoque inicial); ED (Estoque disponível); A (Conexão com parte A); B (Conexão com parte B); M (Conexão com a montadora) MP (Matéria-prima); C1E (Componente 1 embalado); C2E (Componente 2 embalado); S2.2 (Conexão com o Supplier 2.2); DC1E (Distribuição componente 1 embalado); DC2E (Distribuição componente 2 embalado); S1.2 (Conexão com o Supplier S1.2); M4 (Material 4); M5 (Material 5)